弾性波法を主体としたコンクリート構造物の損傷度評価と維持管理に関する実証的研究

葛目　和宏

目次

第１章　序　論

1.1　研究の背景

1.1.1　社会インフラ整備とコンクリート構造物

コンクリートの歴史は、古くは紀元前 9000 年のモルタルの現存が確認されており、その後ギリシャやエジプトで使用され、さらには古代ローマにおいて盛んに使用された古代ローマコンクリートがある [1-1]。ただし、現在用いられているコンクリートが、ポルトランドセメントの水和反応で強度を発現させるメカニズムであることとは異なって、古代ローマコンクリートは火山灰に消石灰、レンガや凝灰岩など、近隣にある天然材料を巧みに利用してつくられたものである。その後、ローマ帝国の崩壊とともにこのローマコンクリートの使用は減少した。建設材料としてコンクリートが注目されるようになったのは、18 世紀になって基礎構造物や水中構造物のために水中でも硬化するモルタルが必要となり、ポルトランドセメントが発明されて以降である。

日本においては明治政府が 1873 年に東京深川に官営工場を完成させ、ポルトランドセメントの生産を開始して以来、多くのコンクリート構造物が社会インフラの建設に利用されてきた。現在の社会インフラの建設材料の主役である鉄筋コンクリート（以下ＲＣと表記）が採用されるまでには、曲げや引張には鉄筋で抵抗し、圧縮にはコンクリートが抵抗する複合構造に関する設計・施工技術の確立への研究期間が必要であったが、コンクリート中では鉄筋が腐食しにくいことが明らかになったこともあり、ＲＣは 20 世紀になって盛んに利用されるようになった。

橋梁についてみると、産業革命以降、物資の輸送のため多くの橋梁の建設が必要となったが、石積みのアーチ橋に匹敵する頑丈な鋳鉄製の橋梁は、英国においてアイアンブリッジが 1779 年に建設されたのが最初とされている [1-2]。ＲＣ橋は、1873 年にフランスで建設されたアーチが最初といわれており、その後 1892 年にＲＣ桁の特許がとられ、1898 年にＴ桁が提案されるなどして欧米でＲＣ橋の建設がすすめられた [1-3]。コンクリート橋は鋼橋に比較すれば経済的であったが、支間を広くできないのが短所とされていた。この問題を解決するため、強度の高い鋼材を強く引っ張ってコンクリートに定着することにより圧縮力を与えるプレストレストコンクリート（以下ＰＣと表記）構造が考案された。この理論的根拠を明確にしたのはフランスのフレシネーで [1-4]、施工法がいろいろ開発された 1940 年頃から広く使われるようになり、我が国では第二次世界大戦後に普及した。

ＰＣ橋は曲げに対する抵抗力が大きいので、通常の鉄筋コンクリートの桁橋よりも桁高が小さくて済むため、自重が小さく、橋桁を長くできることになり、多くの橋梁の建設にＰＣ橋が採用されるようになった。わが国では、1955 年に現在のプレストレスト・コンクリート建設業協会の前身であるプレストレストコンクリート工業協会が誕生し、ＰＣ橋の実用化が進展した [1-3]。

2014 年現在の全国の橋長 15m 以上の道路橋約 165,300 橋に用いられている上部工の材料種別を**図-1.1** に示す。ＰＣ橋とＲＣ橋の合計が約 59%を占めていること、とくにＰＣ橋は 43%と最も建設割合が大きいことが分かる [1-5]。

岸らは、コンクリートの耐久性能に関し表層品質にも注目する必要があることを提言し[1-6]、その研究の中で、優れた健全性を保持している歴代既存構造物の代表格として、我が国最初の本格的なポストテンションＰＣ桁である信楽高原鉄道の第一大戸川橋梁を取り上げ、2008 年 5 月の現地調査結果から同橋を高品質なコンクリートのフラッグシップとして選定している[1-7]。同橋梁は 1954 年に建設されたスパン 30m のＰＣ桁であり、当時世界的にも例がほとんどなかったことから、設計・施工法が慎重に検討され、施工にあたっても十分な実験が行われたと記録されている。この第一大戸川橋梁は、材令約 61 年経過後も鉄道橋として役割を果たしていることから、言い古されたことではあるが、設計・施工に係わる技術者のより良いものをつくるという熱意と情熱に恵まれたコンクリート構造物は美しく丈夫で長持ちするという真実を表しているといえる。

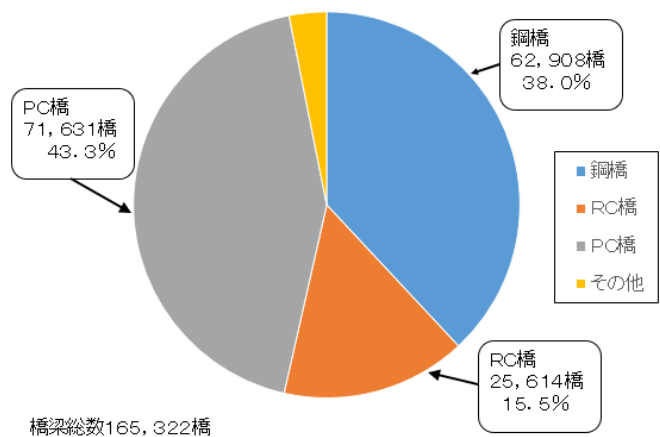



図-1.1　道路橋の上部工材料種別による分類[1-5]

1.1.2　社会インフラの耐久性問題

コンクリートは、セメントは別として、身近な材料である水、砂や砂利を練り混ぜて用いて作るため経済性に優れていることから広く用いられてきた。硬化後は、外観上は人工の石材であるかのように見えることや、鋼材で必要な腐食対策としての塗装がコンクリートの場合は不要であるとされていたこと等から、耐久性は高いと安易に信じ込まれてきた経緯がある。

適切な設計と適切な材料を用いた入念な施工があれば、第一大戸川橋梁に見られるようにコンクリート構造物の耐久性は極めて高い水準あることが証明されているが、1960 年代後半からの高度経済成長期と呼ばれた時代に、コンクリート構造物の耐久性問題がすでに顕在化してきた。この時期から、ポンプ圧送の実用化やレディーミクストコンクリートの普及も相俟って施工の迅速化や専業化が進められた。材料面では、環境保全の観点から河川砂や河川砂利等の採取規制が始まり、良質な河川産の砂、砂利が不足したため[1-8]、海砂や砕石の使用が本格化したが、新しい材料であるため使いこなすための技術開発はややもすれば遅れた。その結果として、除塩不足の海砂に起因する塩害、あるいは塩害と中性化との複合劣化、粒形の悪い砕石の使用による単位水量の増加したコンクリートに起因する乾燥収縮の増大など、低品質のコンクリート構造物が建設されやすい状況となった。また、この時期に多くのコンクリート構造物が、このような背景の下で急激に整備されたことにも留意すべきである。施工の効率性、経済性が強調されるあまり、建設技術者の脳裏から耐久性への配慮が忘れられているかのような時代の流れがあったことも事実として認識しておかねばならない。

コンクリート構造物の耐久性に関して最初に広く警鐘を鳴らしたのは、建設後わずか 10 数年し

か経過していない山陽新幹線で発生したひび割れと浮きを 1983 年３月に報道した NHK の土曜レポート「警告！コンクリート崩壊・忍び寄る腐食」という番組であった。原因は除塩されていない海砂の使用であった。引き続いて山形県の国道７号線において道路橋で塩害が予想以上に進行していることが伝えられた。

さらに、1984 年４月には NHK が「コンクリートクライシス」を放送し、アルカリシリカ反応によるコンクリートの早期劣化問題を伝えた。国会でも取り上げられ、コンクリート構造物に対する塩害とアルカリシリカ反応の影響が大きくクローズアップされることとなった。

高品質な材料を用いて特殊な工法で作られるＰＣと言えども、コンクリートの劣化とは無縁ではなく、特に凍結防止剤を散布するような使用環境にあっては、表面保護工、防水工および排水処理が不十分な構造物では塩害をはじめとした劣化現象が起こり、補修・補強の対象となる例も少なくない。

国土技術政策総合研究所がまとめた橋梁の架け替えに関する調査結果から、ＰＣ橋に関する「上部構造の損傷による架替理由」について、昭和 61 年度、平成８年度、平成 18 年度の間の変遷を**図-1.2** に示す [1-9] 。耐久性に優れるとされているＰＣ橋でも劣化が原因となった架替橋数が徐々に増加しつつあることや、近年は塩害や鋼材の腐食という劣化が増加しつつあることなどが分かる。

なお、ここで本文でも以降、たびたび取り上げる「損傷」と「劣化」について、簡単に定義付けしておくこととする。最近、国土交通省を中心に社会インフラの点検が義務付けられ、その点検要領では、目視で認知できる不具合、例えば過大なひび割れや角欠けなど、性能低下に直結している変状を損傷として取り上げているようである。一方学術的には、劣化は時間経過に伴い発生する変状と定義されている。後述するアリカリシリカ反応は明らかに劣化であるが、本論文では見逃してはならない変状という認識のもとに適宜損傷として表現することとする。

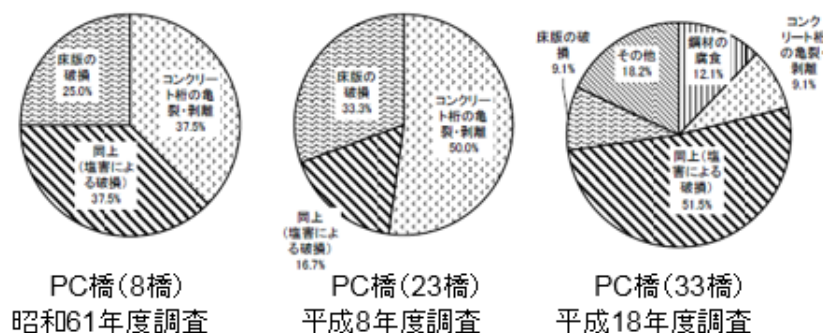



図-1.2　ＰＣ道路橋の架替理由の変遷 [1-9]

1.1.3　社会インフラのストック量

コンクリートの供給量を基に、コンクリート構造物のストック量の累計を整理したものを**図-1.3** に示す。同図の右側は、建設後 30 年を経過した構造物のストック量を示しており、2020 年には約 64 億㎥、2030 年には約 90 億㎥と推定される。

道路橋の高齢化を示す資料を**図-1.4** に示す。国土交通省が発表した橋長２ｍ以上の道路橋の建設年度別橋数を示している[1-10]。同図によれば、建設のピークは1970年代にあり、2030年代には全橋梁数の 65%に相当する橋が建設後 50 年を超えることとなり、社会インフラの高齢化時代への対応が必要となる。

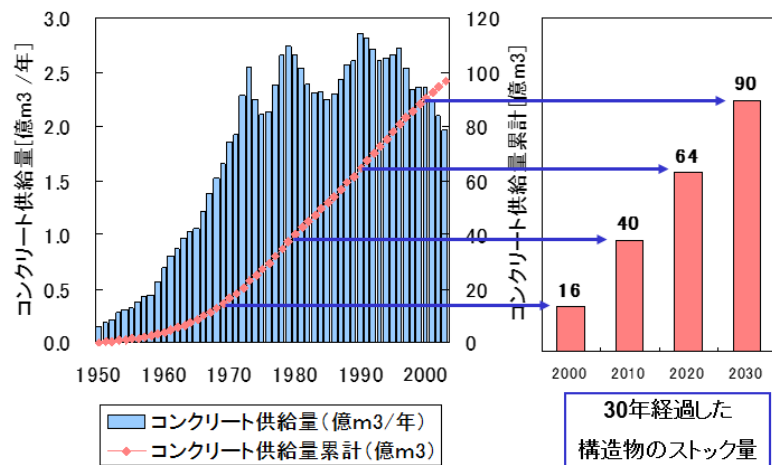



図-1.3　コンクリート供給量と建設後 30 年経過したコンクリート構造物のストック量

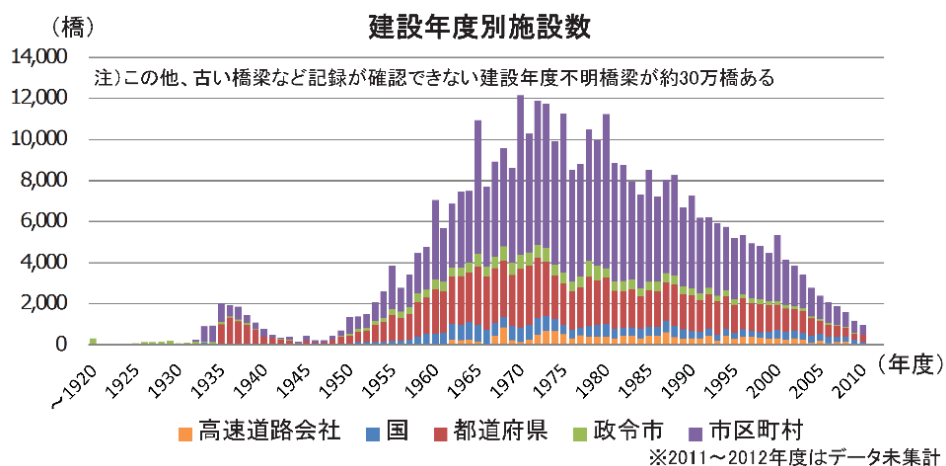



図-1.4　建設年度別施設数[1-10]

1.1.4　社会インフラの維持管理

整備された社会インフラは、供用期間中、適切にその性能を発揮させ、人間生活および国民経済活動に資するよう機能させていくために、適切な維持管理が必要となる。これまであまり注目されてこなかった経年による老朽化が進行していくことから、適切な時期に点検を行い、必要な補修を、時期を失することなく実施することが重要である。我が国の社会インフラは、高度経済成長期に建設されたものが大量にあることや、それらが耐用年数を超えつつあることなどが特徴であり、今後の維持管理更新費の増額が見込まれ、その老朽化の進展が大きな課題として認識されている。国土交通省では、平成 21 年度の国土交通白書において、将来更新費の推計を示し、今後 50 年間で 190 兆円の更新費が必要になるという試算を公表している[1-11]。

社会インフラの耐久性に関する最近の国の取組み事項を整理し、**表-1.1** に示す。

表-1.1　社会インフラの維持管理に関する最近の施策、提言

年　月	内　容
平成 25 年 6 月	日本再興戦略：科学技術イノベーション総合戦略会議 「科学技術イノベーション総合戦略」の提言
平成 25 年 6 月公布 同年 9 月施行	道路法の改正 ①法令・点検基準の体系（ﾄﾝﾈﾙ等の健全性の診断結果の分類に関する告示） ②大型車両の通行の適正化
平成 25 年 11 月	関係省庁連絡会議「インフラ長寿命化基本計画」 インフラ管理者は、①行動計画「インフラ長寿命化計画」 ②個別施設計画「個別施設ごとの長寿命化計画」　を策定する。
平成 25 年 12 月	社会資本整備審議会・交通政　策審議会 「今後の社会資本の維持管理・更新のあり方について（答申）」
平成 26 年 4 月	公共施設等総合管理計画策定にあたっての指針
平成 26 年 4 月	社会資本整備審議会・道路分科会 「道路の老朽化対策の本格実施に関する提言」 ①最後の警告、②都道府県ごとに道路メンテナンス会議設置
平成 26 年 5 月	社会資本の老朽化対策会議 「国土交通省インフラ長寿命化計画（行動計画）」
平成 26 年 6 月	国土交通省　道路橋定期点検要領を改訂
平成 26 年 7 月	改正道路法・施工規則　施行 ①橋梁（約 70 万橋）・トンネル（約 1 万本）等は、国が定める統一的な基準により、5 年に 1 回の頻度で近接目視により点検を行う ②点検、診断の結果等について、記録・保存する ③統一的な尺度で健全性の診断結果を分類する

国土交通省が設置した「社会資本整備審議会・道路分科会」では、平成26年４月に「道路の老朽化対策の本格実施に関する提言」を建議し、「最後の警告」として、本格的な維持管理の実行を提言している[1-12)]。社会資本整備審議会からは、平成14年以降、適切な投資による修繕を行わなければ、近い将来大きな負担が生じるとの警告が繰返し発せられてきたが、財政事情の悪化等から、高速道路管理費の約30%削減（平成17年）、直轄国道維持管理費の10～20%削減（平成21年の事業仕分け）等の逆行する施策が実行されてきた。また、日本の橋梁の約70%を占める市町村管理橋梁では、通行止めや車両重量等の規制実施橋梁が、５年間で２倍に増加し、約2000箇所に達していること、地方自治体では技術者の削減と相俟って点検すらままならない状況となっていることを示している。また、平成24年に発生した中央道笹子トンネルでの天井板落下事故を、老朽化時代が本格的に到来していることを示す象徴的な事例と位置付けている。

削減が続く予算と技術者の減少が限界点を超えたのちに、一斉に危機が表面化すれば対応は不可能となり、1980年代の「荒廃するアメリカ」と同様、「荒廃するニッポン」という事態に直面すると警告し、国に対して一刻も早く本格的な維持管理体制を構築するよう提言している。「道路管理者に対して厳しく点検を義務化」し、「産学官の予算・人材・技術のリソースをすべて投入する総力戦の体制を構築」し、「政治、報道機関、世論の理解と支持を得る努力」を実行するよう求めて、提言を結んでいる。

1.1.5　社会インフラの長寿命化のために求められる技術開発

インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議では、**表-1.1** に示したように、平成 25 年 11 月に「インフラ長寿命化基本計画」を策定・公表した [1-13]。「V. 必要施策の方向性」の項で、(1)点検・診断、修繕・更新等、(2)基準類の整備、(3)情報基盤の整備と活用、(4)新技術の開発・導入、(5)予算管理、(6)体制の構築、(7)法令等の整備、と多岐にわたる課題を示している。それらの中から技術的課題を取出し、**表-1.2** に示す。

表-1.2　インフラ長寿命化基本計画「必要施策の方向性」に示された技術的課題 [1-13]

必要な施策の項目	内　　容
点検・診断	一定の技術力を持った人材の確保・育成に取り組むことで、点検・診断の精度向上を図る 安全性の向上やコスト縮減に配慮しつつ、新技術を積極的に活用することで、有用な新技術の開発・導入・普及を後押しする
老朽化対策における技術開発・導入の重要性・必要性	目視等のこれまでの手法では確認困難であった損傷箇所等も的確に点検・診断・対処することが重要であり、そのためには、技術開発や新技術の導入を積極的に推進することが必要
技術開発・導入の方向性	ICT、センサー、ロボット、非破壊検査、補修・補強、新材料等に関する技術研究開発を進め、それらを積極的に活用する

老朽化対策に関しては、目視等のこれまでの手法では確認困難であった変状箇所等も的確に点検・診断・対処することが重要であるとし、技術開発・導入の方向性として、ICT(情報通信技術)、センサー、ロボット、非破壊検査等を挙げている。

また、具体的な目標年度として、2020 年頃には国内の重要インフラ・老朽化インフラのうち 20%に対してはセンサー、ロボット、非破壊検査技術等の活用により点検・補修が効率化され、2030 年には国内の全ての重要インフラ・老朽化インフラに非破壊検査技術等が活用され、高度で効率的な点検・補修体制が実現されることを掲げている。非破壊検査技術に対する期待が大きいのが読み取れる。

家田は、メンテナンスに関連した技術開発に関して、これまで戦略的な技術開発が行われてこなかったと指摘し、これからの方向性を示している [1-14]。これを要約して以下に示す。

財政難と維持・更新に掛かる費用を比較する論議が往々にして行われるが、それは従来と同じ

やり方をすることが前提となっている。これを改め、もっと効率よく維持・更新できるような技術を開発すれば、コストダウンと同じ効果を発揮することから、経費そのものを安くできる可能性もある。非破壊検査に関しても、視点を変えた技術開発を行うべき時期である。

また、メンテナンスの仕事はひとつひとつの規模が小さいため、技術開発をするメリットが生じないという問題点に関しては、メンテナンス業務の発注単位を大きくまとめることや長期メンテナンス契約も検討すべきである。受注者にもメリットがあり、波及的には管理者にとってもメリットが及ぶシステムの構築が望ましいことを示している。

1.1.6 コンクリート構造物の維持管理と非破壊検査

コンクリート構造物の維持管理の基本的な手順は、**図-1.5**のように表される。構造物に対して、維持管理計画をつくり、点検を行い、点検結果や環境条件から劣化機構の推定および劣化予測を行って構造物の性能を評価して、対策の要否判定をするというのが一連の流れとなっている[1-15]。このように維持管理では点検が基本であり、土木学会では、点検結果から補修・補強などの対策の種類やその実施時期を判定するまでを診断と呼び、これらの記録をデータベース化するなどして適切に残すことを推奨している。

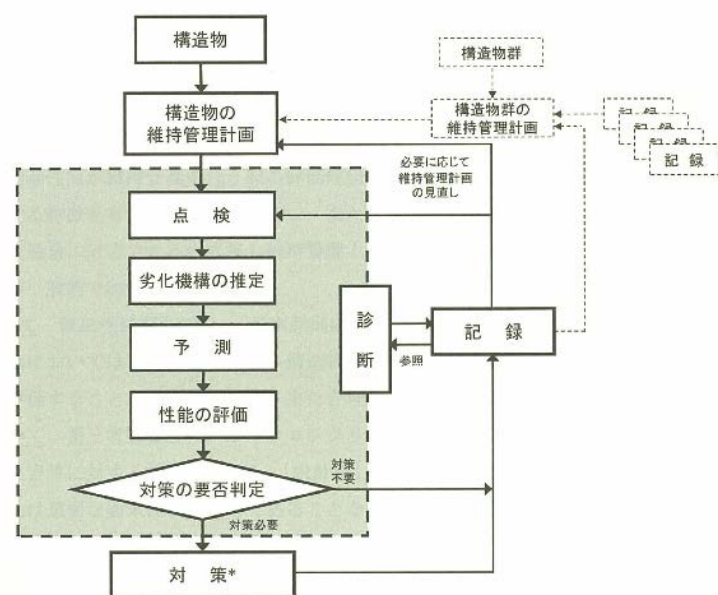



図-1.5 維持管理の手順[1-15]

現状、供用年数が長くなった構造物、耐用年数が過ぎ去ろうとしている構造物は、漸増傾向にある。しかも、構造物個々の設計仕様、設計思想が同じであっても、使用材料、施工方法、供用環境条件が異なり、まさに千差万別の状態の構造物が存在する。外観上は同じ構造物であっても、生まれも育ちも様々に異なる構造物の維持管理を行っていかなければならないという課題が存在する。加えて、外観上は顕著なひび割れ、浮き等が無い、一見、健全な構造物であっても、内部に問題点を抱えている可能性の有る構造物への対応も大きな課題である。

点検は、維持管理の基本として重要な位置にあるが、我が国では管理者によって、方法や頻度、評価基準などが異なり、また構造物の点検に従事する技術者の養成方法や資格が異なるため、その結果を共通的に取扱うことは難しい状況にある。また、機材をほとんど使用しない目視点検では、その結果が作業者の経験や知識による個人差が大きい。そのため変状の有無や大小などの一次的なデータの比較は可能であっても、数量の多い場合や劣化機構を推定するなど、客観的なデ

ータの収集や技術的な判断を要する記録の整理という面では、一元的な取り扱いが難しいのが実情である。特に通常の定期点検では、どの管理者でも、構造物に接近して目視とたたき点検を主体に構造物の性能低下に直結するような変状の検出を第一義としている。しかし、この目視点検とたたき点検こそ、点検結果が点検員の習熟度や、作業環境などに左右されやすいという問題がある。

例えば、外観目視点検の成果としてひび割れ状況図が作成されるが、調査員の資質により取り上げるひび割れの選択基準が異なること、記入方法に個人差があること等から、ひび割れ状況図を作成しても、ひび割れ発生状況の経年的な比較が困難であるとの指摘がなされることがある。補修等を行っていないにもかかわらず、前年確認されていたひび割れが、今年の調査結果では記載されていない等の問題点もある。たたき点検についても同様であり、点検員により、特に浮きの判断が異なるケースが多々認められる。その結果として、出来上がった損傷状況図が点検員により異なり、目視検査同様、経年変化の有無が的確に把握できないこととなる。これらの問題点を解消するために活用可能な点検手段が、「(簡便な) 計測装置を用いた非破壊検査技術」であると考えられ、さらに、非破壊検査技術は、維持管理業務の点検の補助的手段だけでなく、目視あるいはたたき点検で把握出来ないほど細かいレベルで生じている損傷の経時変化を把握できることも大きな利点の一つとしてあげることが出来よう。

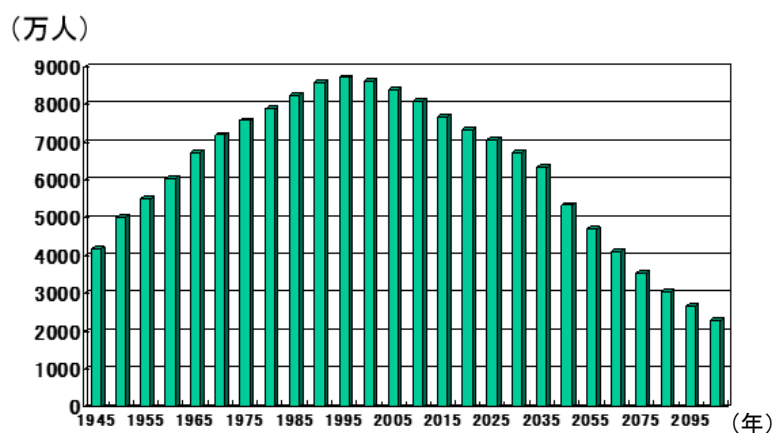
1.1.7　社会インフラの長寿命化のために求められる人材

一方、わが国の人口は、**図-1.6** に示すように少子高齢化の進行により生産年齢人口が減少し、維持管理に対応できる人材の絶対数が長期低減傾向にある。維持管理すべきコンクリート構造物のストック量が増加するのに対し、維持管理に従事する人材が減少する状況下での対応が必要となる。

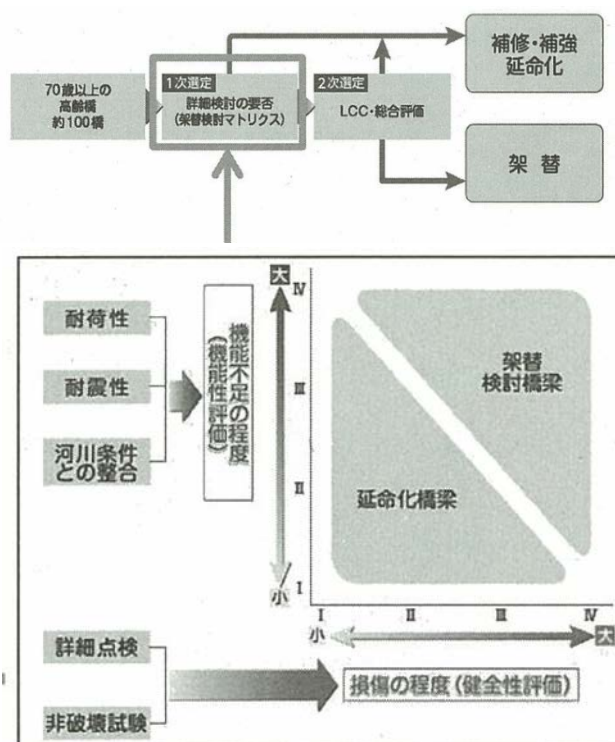
図-1.6　生産年齢人口（15 歳～64 歳）の推移

人材の量的な問題に加え、人材の質、人材による調査結果のばらつきも問題となって来ている。

一例として、大阪市で実施されている橋梁マネジメントシステムから、人材の質について概観する [1-16]。大阪市の橋梁保全更新計画では、架替判定が実施されている。対象は、戦前に建設され 70 年以上経過した「高齢橋」100 橋である。

点検結果および構造照査結果をもとに、架替検討マトリックスに従って、詳細検討の必要性が有る橋を一次選定し、「架替検討橋梁」と判断された橋について、ライフサイクルコスト分析に基

づく総合評価を加え、補修・補強による延命化あるいは架替の判定を行うシステムである。

大阪市では、橋梁データベースを作成し、橋梁点検診断、データ入力（点検結果)、健全度の評価、管理計画の策定、対策工事の実施、データ入力（対策履歴)、橋梁点検診断のマネジメントサイクルを回しているが、ボトルネックとして、①点検における課題（近接できない箇所の存在、等）②診断における課題（受注者の診断におけるバラツキ)、③データベース入力における課題（点検・判定・診断等、実施状況の着実なデータ入力）を挙げている。システムとして稼動させることが出来ているものの、バラツキという質の問題が指摘されており、今後の社会インフラの維持管理における大きな課題である。

図−1.7　大阪市の橋梁保全更新計画 [1-16)]

1.1.8　取り組むべき課題

コンクリート構造物の維持管理に関して最近、高速道路３社・都市高速道路各社において「大規模更新・大規模修繕計画」に関する検討が行われており、損傷状況が示されるとともに、計画の実施にあたっての課題も整理されている。たとえば、阪神高速道路会社では、大規模更新・大規模修繕を実施するにあたっての課題として**表−1.4** に示す項目を挙げている [1-17)]。

管理空間が狭隘で直接確認できない構造やコンクリート内部に配置されたＰＣ鋼材などについても劣化状況を詳細に把握することの必要性や、目視できない構造部位に対する点検技術の開発、構造物の損傷度を診断・評価する技術の開発が課題として明記されている。

老朽化した社会インフラが増加する中で、点検に携わる技術者の絶対数が不足しており、しかも一方では、その技術者間の「質の差、バラツキ」が顕在化、問題化しているのがわが国の今の状態である。社会インフラの適切な維持管理に要求されるのは、必要な時期に定期的に診断を行って、表面に現れない変状も含めて早期に把握し、その変状のレベルに応じた補修・補強、場合によってはアップグレードを行うことである。そうすることで、構造物の供用期間全体における維持管理費用を低減することが可能となる。老朽化した社会インフラの維持管理に対して真に重要なのは、構造物の現状を正確に捉えることである。それが大前提となる。外部からは見えない構造物内部の状態を含めて、構造物の状態を正確に知ることが維持管理の根本である。正確に知る、正確に人為差が無いように把握することが要求される。この人為差を無くすためには、技術

者の質の向上による対応も必要であるが、計測器の使用による人的誤差の解消もまた重要である。結果の判断には、もちろん技術者の判断、いわゆる高度な判断が必要な部分も当然あるが、基盤となるのは人為差を含まない正確なデータである。計測器の適切な使用によって正しいデータを収集することで、技能を有する技術者が判断するに値するデータとしなければならない。また、構造物の外観のみならず、内部の状況を的確に把握するには、コア採取やはつり等の物理的破壊を伴う手法を無制限に適用することは不可能であるので、非破壊的な検査技術、調査手法が最も適している。

表-1.4　阪神高速道路会社における大規模更新・大規模修繕実施にあたっての課題（抜粋）[1-17)]

取組み事項	内容
点検の強化、 健全性評価及び劣化予測	①損傷が発生・進行しやすい構造をくまなく点検すること ②管理空間が狭隘で直接確認できない構造やコンクリート内部に配置されたＰＣ鋼材などについても劣化状況を詳細に把握すること
技術の開発	①目視できない構造部位に対する点検技術 ②構造物の健全度を診断・評価する技術 ③鋼床版等に対する耐久性の高い補修・補強技術 ④騒音・振動など環境低減型の技術 ⑤都市機能を阻害しない施工技術 ⑥構造物撤去・再構築に関する急速施工技術

社会インフラが抱える維持管理上の重要課題について検討するため、筆者が約 40 年にわたって携わってきたコンクリート構造物の維持管理に関わる調査検討内容を**表-1.5** に示す。

道路管理者や鉄道事業者から、コンクリート構造物に生じた各種の変状、顕在化した劣化が示され、それらに対して調査を行いどう対処すれば良いのかを提案するのが筆者の役割であった。

中性化および塩害からスタートし、1980 年代にはアルカリシリカ反応に関する検討が急増する一方で、道路交通の大型化等により床版の疲労問題も俎上に上がり、さらには塩害とアルカリシリカ反応、中性化と塩害の複合劣化も克服すべき課題として調査対象となった。また構造物が立地する地域によっては、土壌中に含まれる化学物質に起因するコンクリートの劣化も大きな問題となり、調査等に対処してきた。当初は調査関係での対応が中心であったが、土木学会コンクリート示方書に維持管理編が新設されたこと、あるいは、2000 年に「コンクリート構造物の補修・補強、アップグレードシンポジウム」が発足したこともあり、近年は補修･補強に関する検討業務も増加し、一連の調査結果を踏まえて補修補強方法を提案した事例も数多い。これらの課題の検討にあたっては、外観目視検査、コア詐取等によるコンクリートの性状把握等に加え、非破壊検査手法の適用も積極的に行ってきた。列挙すれば、超音波法によるコンクリートの性状把握・欠陥探査、自然電位法および分極抵抗法による鋼材腐食に関する調査、電磁誘導法による鋼材探査、

Ｘ線法および衝撃弾性波法による欠陥探査等、技術提案および実務的実施に先駆的に実施して対応してきた。

それら各種変状や劣化に広範に対処してきた経験を踏まえて、現在、わが国の社会インフラが抱える問題点を直視した場合、喫緊の課題は、ＰＣ構造物におけるグラウト充填不良の把握およびアルカリシリカ反応が顕在化した構造物の内部劣化状況を把握することであると考え、本研究の対象をこれらに設定した。

表-1.5　コンクリート構造物の維持管理に関し対応した技術内容

区　分	内　容
塩害	内在塩分（未除塩海砂）による損傷を受けたＰＣ構造物、ＲＣ構造物調査
	飛来塩分による損傷を受けたＰＣ構造物、ＲＣ構造物に関する調査
	凍結防止剤・融氷剤により損傷したＰＣ構造物、ＲＣ構造物に関する調査
	飛来塩分の影響を受ける海岸構造物のアップグレード対策の検討
アルカリシリカ反応	原因不明のひび割れに対する現況調査、原因解明調査
	ＡＳＲによる損傷と判断されたＰＣ構造物、ＲＣ構造物の現況調査
	ＡＳＲにより損傷したＰＣ構造物、ＲＣ構造物の耐力検討と補強設計
	ＡＳＲによる損傷を受けたＰＣ構造物、ＲＣ構造物の性能維持対策の検討
	非破壊検査手法によるＡＳＲにより損傷を受けた構造物の調査
複合劣化	凍結防止剤等による塩害とアルカリシリカ反応の複合影響を受けたＰＣ構造物、ＲＣ構造物の現況調査、対策検討
凍害	積雪寒冷地のＰＣ構造物、ＲＣ構造物の現況調査及び耐久性確保の検討
	塩化物イオンの影響を受けた地下鉄トンネルの耐久性向上対策
疲労	道路橋床版の疲労状態の判断業務
	道路橋床版の耐疲労性状向上策の検討
化学的腐食	土壌中の硫酸塩の影響により損傷したコンクリート構造物の現況調査
	土壌中の硫酸塩の影響により損傷したコンクリート構造物の補修検討
	下水道コンクリート構造物の現状把握、耐久性評価、補修検討
補修・補強	各種損傷に対する補修・補強検討（塩害、ＡＳＲ、疲労、複合劣化）
	炭素繊維シート等を用いた補強設計
ＰＣグラウト	ＰＣグラウトの充填状況調査
非破壊検査技術	衝撃弾性波法によるコンクリート構造物診断
	X 線透過法によるコンクリート構造物診断
	赤外線法による非破壊検査技術
	自然電位法による非破壊検査技術
	超音波法による非破壊検査技術
	電磁波法による非破壊検査技術

1.2　研究の目的

本論文において開発すべき技術課題として、「ポストテンションＰＣ構造物のグラウト充填状況を把握する技術の確立」および「アルカリシリカ反応が顕在化した構造物の内部劣化状況を把握する技術の開発」を挙げたが、この２つの課題に共通するのは、構造物の内部状況を的確に把握する技術であり、構造物を供用したままの状態で、構造物が持つ諸特性をデータによって的確に評価する技術である。

供用中の構造物を対象とする検査の場合、コア採取やはつりを伴う評価技術はデータの信頼性の面で優れた検査方法であるものの、第三者影響の防止あるいは構造物への物理的影響の面から見ると、実施できる調査数量にはおのずと限界がある。一方で、対象となるコンクリート構造物の状態を的確に把握するためには、できるだけ広い範囲で多くのデータを収集することが必要である。経年的に繰返しデータを収集することが必要なケースもある。非破壊検査は、これらの問題に一つの解を与えるものである。構造物に損傷を与えることなく繰り返して何度でも検査を実施できるのが、非破壊検査の特徴であり、強みでもあるからである。

1.1.5 項でインフラ長寿命化計画における技術的課題を示した。2030 年には全ての重要インフラ・老朽化インフラに非破壊検査技術等が活用され、高度で効率的な点検・補修体制が実現することを目標として掲げている。持続可能な社会インフラを整備していくために、高齢化した構造物の維持管理において、非破壊検査を今まで以上に積極的に活用することが期待されている状況である。

具体的な非破壊検査方法については２章で詳述するが、筆者はコンクリート構造物の維持管理の分野で橋梁を対象とした非破壊検査に長年携わってきた。その間の幾多の業務、使用した広範な非破壊検査手法および機器を通じて、私が考える非破壊検査の有るべき姿、実務を通じて修得した非破壊検査の本来有るべき姿は以下の３点である。

１．簡単な原理であること
２．直ぐに答えが出ること
３．装置がなるべく単純で、安価であること

１．簡単な原理であること

測定原理や適用範囲が単純かつ明快であることが必須である。取扱い説明書を隅々まで読まなければ適用範囲を把握できない手法・装置は現場での非破壊試験方法としての的確性に欠ける。

２．直ぐに答えが出ること

もし、異常なデータであれば再測定を行って正しい値を確認する必要があるため、計測が終われば、直ぐに結果が表示されること。

３．装置がなるべく単純で、安価であること

装置は取り扱いが簡単で壊れにくいように単純なものが良く、手に入れやすいように安価なも

のが良い。

これらの条件を踏まえて、２章で適切な非破壊検査手法についての検討を行う。

1.3　論文の構成

本論文は、ポストテンションＰＣ構造物のグラウト充填不良、アルカリシリカ反応が顕在化した構造物内部のコンクリートの状態把握を主眼に、適切と考えられる非破壊検査方法を取り上げ、実構造物への適用を含めて検討した一連の研究をまとめたものであり、全編を**図-1.8**に示すように５つの章で構成した。

第 1 章 序論　では、本研究の背景、目的、構成について述べた。

第 2 章 コンクリート構造物の非破壊検査に関する既往の研究　では、ポストテンションＰＣ構造物のグラウト充填不良およびアルカリシリカ反応が顕在化した構造物内部のコンクリートの状態を把握するために有効と考えられる非破壊検査方法を示し、それらの概略説明、特徴および評価について取りまとめた。

第 3 章 ＰＣグラウト充填状況の非破壊検査方法　では、ＰＣ上部工の床板横締めや横桁横締めのグラウト充填状況を評価する方法としての衝撃弾性波法の測定方法や測定精度について検討した。また、主桁の縦締めＰＣ鋼材のグラウト充填度の評価に対してはインパクトエコー法をとりあげ、その適用にあたっての留意点や、測定精度について検討した。

第 4 章 アルカリシリカ反応が顕在化した構造物の非破壊検査方法　では、斜角法超音波測定によるひび割れ深さの把握および超音波トモグラフィ法によるコンクリート構造物内部の劣化程度の評価について検討した。

第 5 章 結論　では、本研究で得られた成果を総括し、ポストテンション方式で建設されたＰＣ構造物のグラウト充填不良が問題になる場合と、アルカリシリカ反応が顕在化した構造物を対象に非破壊検査によって維持管理を行う場合の効率的なシナリオの提案を行った。

１章　序論

・社会インフラの現状と耐久性上の課題

・コンクリート構造物の維持管理と非破壊検査

・取り組むべき重要課題

①ポストテンションＰＣ構造物のグラウト充填不良

②アルカリシリカ反応が顕在化した構造物の内部劣化状況の把握

・研究の目的　：　２つの重要課題に「非破壊検査法」を適用し、実用化技術を確立

↓

２章　コンクリート構造物の非破壊検査に関する既往の研究

・コンクリート構造物に適用される非破壊検査法

・本論文の課題に適用可能と考えられる非破壊検査法の概略、特徴および評価

↓

３章　ＰＣグラウト充填状況の非破壊検査方法

・横締めＰＣ鋼材の衝撃弾性波法によるグラウト充填状況調査

・縦締めＰＣ鋼材のインパクトエコー法によるグラウト充填状況調査

４章　アルカリシリカ反応の顕在化した構造物の非破壊検査方法

・斜角法によるコンクリート構造物内部の非破壊検査

・トモグラフィ法によるコンクリート構造物内部の非破壊検査

↓

５章　結論

・コンクリート構造物維持管理シナリオにおける弾性波法の利用

・非破壊検査に要求されるもの

図-1.8　本論文の構成

【参考文献】

1-1)　土木学会コンクリート委員会：古代ローマコンクリート、pp.3、コンクリートライブラリー131、2009.4

1-2)　合田良実：土木と文明、鹿島出版会、1996.3

1-3)　多田宏行：橋梁技術の変遷、鹿島出版会、2000.12

1-4)　J.A.Fermandez Ordonez・池田尚冶監訳：ＰＣの原点フレシネー、建設図書、2000.5
1-5)　国土交通省：道路統計年報 2014.4
1-6)　土木学会コンクリート委員会：歴代構造物品質評価/品質検査制度研究小委員会（216 委員会）成果報告書およびシンポジウム講演概要集、コンクリート技術シリーズ　No.87、2009.11
1-7)　上田　洋：第一大戸川橋梁、コンクリート工学　Vol.46、No.9、pp.35-38、2008.9
1-8)　砕石協会：砕石骨材需給表　http://www.saiseki.or.jp/pdf/18shinzai.pdf
1-9)　国土交通省　国土技術政策総合研究所：橋梁の架替に関する調査結果（Ⅳ）、国土技術政策総合研究所資料、第 444 号、2008.4
1-10)　社会資本整備審議会・交通政策審議会「今後の社会資本の維持管理・更新のあり方について」答申、参考資料、pp.48、国土交通省、2013.12
1-11)　内閣府政策統括官（経済社会ｼｽﾃﾑ担当）：日本の社会資本 2012、2012.11
1-12)　社会資本整備審議会・道路分科会建議「道路の老朽化対策の本格実施に関する提言」、2014.4.14
1-13)　インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議、インフラ長寿命化基本計画、2013.11
1-14)　家田　仁：巻頭言 メンテナンス業務全体の体系化が必須、土木施工、Vol.55、No.8、pp.19、2014.8
1-15)　土木学会：2013 年制定　コンクリート標準示方書　維持管理編、2013
1-16)　奥兼治：なにわ八百八橋の保全に向けて、第 7 回 CAESAR 講演会資料、pp.55-74、2014
1-17)　阪神高速道路の長期維持管理及び更新に関する技術検討委員会　提言（案）、2013.4.17

第２章　コンクリート構造物の非破壊検査に関する既往の研究

2.1　コンクリート構造物に適用される非破壊検査方法

社会インフラの多くを占めるコンクリート構造物を、将来にわたって持続可能な施設として適切に維持管理していくために、点検を精度良く実施することが重要である。しかし、点検すべき対象物の数が莫大であることに加え、対象物の種別や供用環境が多岐にわたるため、全てを詳細に接近点検することは現実的ではない。このため点検を一次的に外観目視観察で行い、その結果から変状の有無を大まかに判別し、構造物の健全度を詳細に点検すべきものを抽出して、詳細点検するという手順をとることが多い。

詳細点検では、変状の種類や規模に応じて、さまざまな調査方法が採用されるが、部材をはつることなく、極力コンクリート構造物を傷つけずに点検できる非破壊検査を多用することが望ましい。土木学会コンクリート標準示方書・維持管理編では、このような場合に適応できる非破壊検査方法として、**表-2.1** に記載の各方法を示している[2-1]。

表-2.1　非破壊検査方法と得られる情報

調査方法		得られる情報の例
反発度に基づく方法	反発度法	・コンクリートの強度
弾性波を利用する方法	打音法 超音波法 衝撃弾性波法 アコースティック・エミッション（ＡＥ）法	・コンクリートの圧縮強度, 弾性係数等の品質 ・コンクリートのひび割れ深さ ・コンクリート中の浮き，剥離，内部欠陥 ・コンクリート厚さ等の部材寸法 ・ＰＣグラウトの充填状況
電磁波を利用する方法	Ｘ線法 赤外線法（サーモグラフィ法） 電磁波レーダ法	・コンクリート中の鋼材の位置，径，かぶり ・コンクリート中の浮き，剥離，空隙 ・コンクリートのひび割れの分布状況 ・ＰＣグラウトの充填状況
電磁誘導を利用する方法	鋼材の導電性および磁性を利用する方法 コンクリートの誘電性を利用する方法	・コンクリート中の鋼材の位置，径，かぶり ・コンクリートの含水状態
電気化学的方法	自然電位法 分極抵抗法 四電極法	・コンクリート中の鋼材の腐食傾向 ・コンクリート中の鋼材の腐食速度 ・コンクリートの電気抵抗
ファイバスコープを用いる方法		・コンクリート内部の状況 ・ＰＣグラウトの充填状況

※参考文献(2.1) pp.43 解説 表 3.7.2 の非破壊試験に関する部分だけを抜き出したものである.

詳細点検の目的や構造物の供用環境などによって評価項目が異なることに加え、評価項目が同一でも調査方法がいくつか存在することから、最適な方法を選択する必要がある。

例えば、反発度に基づく方法は、厳密に言えば、コンクリート表面の硬度を計測するものであって、コンクリート強度を計測する方法ではないが、測定器が広く市販されていること、簡便に取り扱えることなどから、使用実績は多い。しかし、器具の取り扱いや測定方法が JIS に定められており、これを守らなければ測定値の正確さに欠けることに注意する必要がある。

弾性波に基づく方法は、得られる情報の種類が、コンクリートの圧縮強度、ひび割れ深さ、剥離、空洞、ＰＣグラウト充填状況と他の方法に比べて多いこと、また、調査方法そのものが、打音法、超音波法、衝撃弾性波法、ＡＥ法と多岐にわたっているのも特長となっている。これは、弾性波法の伝播特性、速度、振幅、周波数をそれぞれ評価対象ごとに変化させることによって様々な用途が広がるためである。それだけに、弾性波を伝播させる経路、反射・散乱させる因子など、測定結果に影響する要因を適切に排除して、注目する事象を適確に把握できるようにしなければならないが、発振あるいは受振を工夫することで、より明確に評価対象を捉える可能性を秘めていることになり、適用範囲を広げることができるとも言える。

電磁波を利用する方法は、取り扱いが簡便でかつ広範囲の調査が可能な手法であるが、測定者の技量や経験による差が生ずるのが現状であり、使いこなし難い手法である。

電磁誘導を利用する方法は、従来からコンクリート構造物中の鉄筋を探査する方法として利用されているが、土木構造物のように大型の構造物には適用範囲が限定される傾向にある。

電気化学的方法は電気化学に立脚する技術であるが、コンクリート構造物中の鉄筋腐食を対象とした場合、測定値の正確さの面から習熟している技術者が意外と少ない技術である。

ファイバスコープは、装置を目的とする箇所に上手く近づけ、的確に照射することが難しい技術である。測定中の範囲が実構造物のどの位置なのかを正確に把握することも重要である。

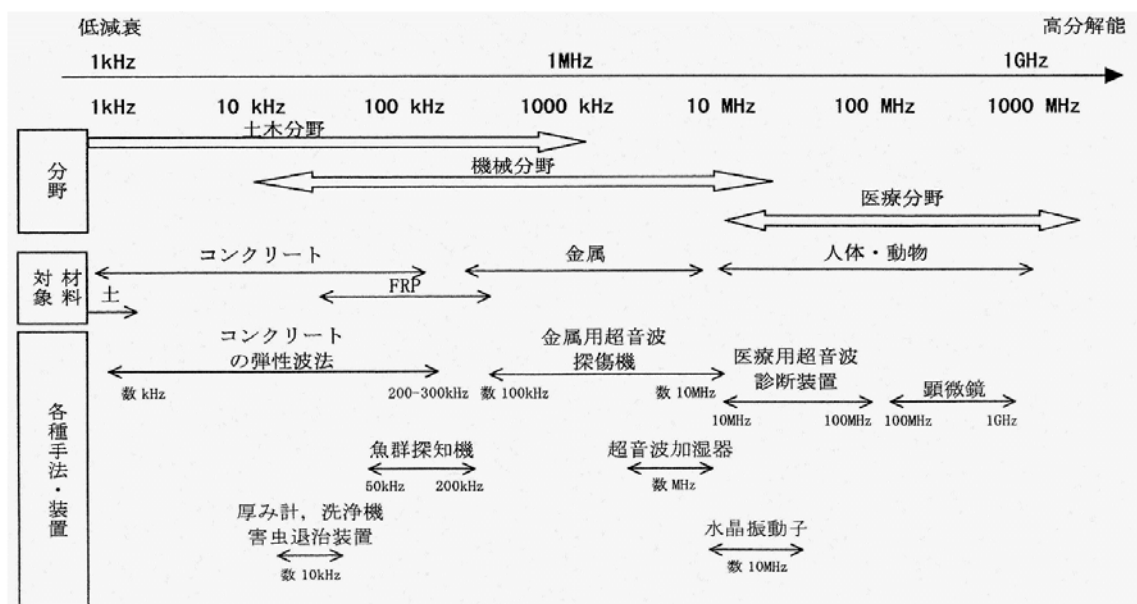
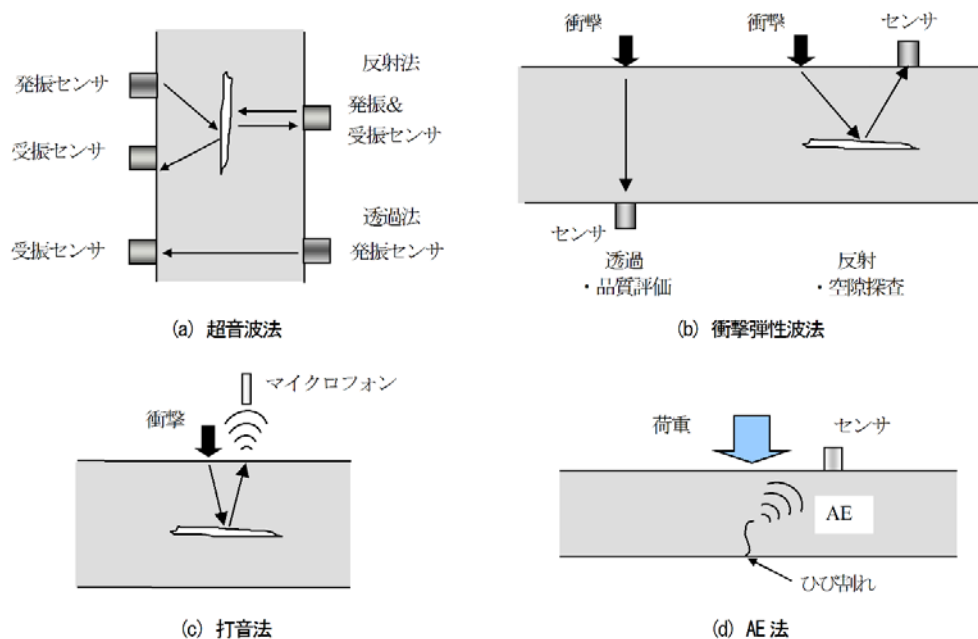



図-2.1　弾性波の周波数範囲から見た各分野での利用状況 [2-2]

図−2.1 は弾性波法の適用範囲が、周波数範囲から見た場合にどのあたりに位置付けられるかを示したものである。弾性波法がコンクリートのような複合材料に適していること、精密な医療分野と離れた位置にあって、土木構造物向きの比較的平易で安価な手法であることが認められる。

図−2.2 は弾性波法を発振、受振方法の違いから超音波法、衝撃弾性波法、打音法、ＡＥ法の４種類に分けて示したものである。このうち、超音波法、衝撃弾性波法は、汎用性が高く、実績も多い手法であるので、これらの手法を中心に研究を進めることとした。

図−2.2　弾性波法の分類 [2-3)]

2.2　弾性波法を中心とした非破壊検査方法

本論文における研究課題は、①ポストテンションＰＣ構造物のグラウト充填状況を把握する技術の確立、②アルカリシリカ反応が顕在化した構造物の内部劣化状況を把握する技術の開発である。各非破壊検査方法を、上記の研究課題への適用性という観点から精査した結果を**表−2.2** に示す。

2.2.1　衝撃弾性波法

広義の弾性波法は、コンクリート表面に設置した発振子あるいは衝撃入力装置によってコンクリート内部に向けて弾性波を発生させ、その波（伝播波、透過波、反射波、共振波）を受振子で把握することで、空洞等のコンクリート内部の欠陥や部材寸法を測定する手法である。弾性波の利用という面では超音波法と同じであるが、超音波法では電気的な作用で弾性波が入力されるのに対し、衝撃弾性波法は打撃等による入力であるため、エネルギーが強く、また、含まれる周波数成分が幅広いのが特徴である。したがって、測定目的に合わせて適切な周波数を選定する必要があり、数kHz程度以下の低周波数を用いるシステムでは伝播距離を10m程度とすることが可能であるが、測定精度が低下し、

表-2.2　本論文の課題に対し適用可能と考えられる非破壊検査方法

研究課題	関係する非破壊検査方法
ポストテンションＰＣ構造物のグラウト充填不良	①超音波法 ②衝撃弾性波法 ③インパクトエコー法 ④Ｘ線透過法 ⑤赤外線法 ⑥磁力共鳴法 ⑦電磁パルス法
アルカリシリカ反応を生じた構造物のひび割れ深さおよび内部コンクリートの劣化	①超音波法 ②超音波トモグラフィ法

検出可能な欠陥寸法は大きくなる。また、50kHz以上の高周波を用いる場合は、波の減衰が大きいため、測定可能な欠陥深さや部材寸法は通常、２～３m程度である。

衝撃弾性波法は、弾性波法のひとつに位置づけられるものである。ハンマ等によりコンクリート表面を打撃して弾性波を発生させ、コンクリート部材中を通過した弾性波を、部材反対側あるいは打撃面近傍に配置した探触子でとらえ、波形解析等を加えて評価するものである。利用する弾性波の種類、伝播特性、測定形態などによって様々な計測手法が提案されている。衝撃弾性波法の概要を**図-2.3**に示す。ＰＣグラウトの充填評価にも適用されており、その測定概要と測定状況を**図-2.4**および**写真-2.1**に示す。

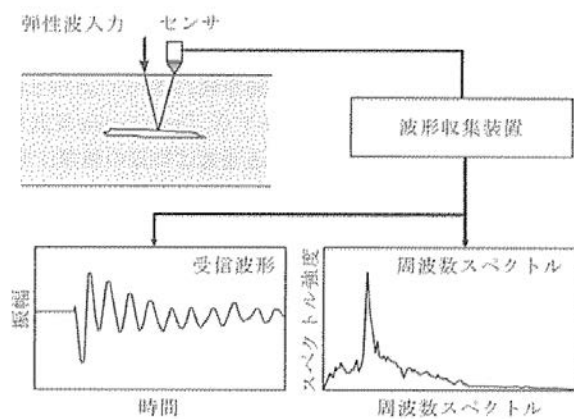



図-2.3　衝撃弾性波法の概要 [2-4]

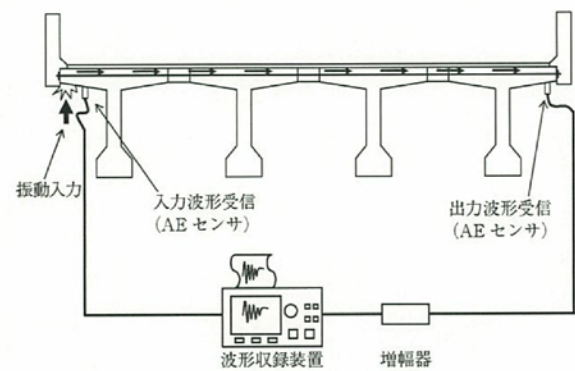



図-2.4　実橋における衝撃弾性波法の測定[2-5]

ＰＣグラウト充填状況の調査に衝撃弾性波法が適用されたのは1990年代の半ばからであり、当時は打音振動法と呼ばれていた。その後、弾性波の入力方法や測定結果の評価方法について検討・改良が加えられて現在に至っている。広義の衝撃弾性波法は、主に床版や横桁に配置された横締めＰＣ鋼材

写真-2.1　衝撃弾性波法の測定状況 [2-5]

に対して適用され、鋼材全体のグラウトの充填状況の判定に用いる。一方、衝撃弾性波法のひとつであるインパクトエコー法は、主桁ウエブや床版に配置されたＰＣ鋼材の特定のポイントにおける判定に用いられる、いわば、部分的なグラウトの充填状況評価を判断する手法である。

衝撃弾性波法では、ＰＣ鋼材の定着部付近のコンクリート表面をハンマやバネポインタなどで打撃して弾性波をコンクリートに入力し、入力時の信号と伝播した弾性波を反対側のＰＣ鋼材定着部付近でＡＥセンサを用いて出力信号として受振する方法である。１本の横締めケーブル全長に対するグラウト充填の確認に利用されるものであり、グラウト充填状況によって伝播特性が変化することを利用した非破壊検査手法である。グラウトの充填状況が不完全な場合は、入出力比が大きく伝播速度が速い傾向が認められるが、グラウトの充填状況が完全な場合は、入出力比が小さく伝播速度が遅い傾向を示す。これらの関係を利用して、グラウト充填状況に対する入出力比と伝播速度の閾値を設定して評価できる。閾値を設定するためには、対象となるＰＣ鋼材や定着具の種類および長さを考慮した既往の実績を基に、測定結果でグレーゾーンと評価されるケーブルについて数本を選定し、これらを削孔・目視確認することが必要である。ただし、この測定方法では弾性波伝播速度を指標としているため、対象鋼材全体におけるグラウトの充填状況が把握され、グラウトが未充填の箇所の特定はできない。

2.2.2　インパクトエコー法

インパクトエコー法は、衝撃弾性波法の一つに位置付けられる方法である。入力した弾性波をコニカル型広帯域変位振動子により受振し、受振波の周波数解析結果からコンクリート内部の欠陥評価等を行うものである。コンクリート表面に打撃などにより弾性波が入力された場合、弾性波の縦波成分は、コンクリート内部の欠陥あるいは異なる材料の境界面において反射を起こし、コンクリート表面と欠陥あるいは異なる材料の境界面との間に、縦波共振現象という、往復する定常な波が生じる。

インパクトエコー法はこの現象を利用して入力点付近で計測された波形の周波数スペクトルのピーク位置からコンクリートの内部状況を推定する方法であり、この原理にしたがってコンクリート内部の欠陥評価を行う手法は、Impact-Echo Method という名称で、米国ではASTMとして規格化されている（ASTM C1383-98a　Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method）。

インパクトエコー法は、測定機器が小型であり、測定結果をリアルタイムで表示できるなど、作業性、利便性に優れており、グラウト充填状況の評価などに用いられている。

測定に使用する装置および測定状況を**写真−2.2**および**写真−2.3**に、グラウト充填不良による空隙の評価原理を**図−2.5**に示す。シース内にグラウトが完全に充填されていると、周波数スペクトル上にコンクリート部材の厚さ方向で多重反射した弾性波の共振周波数 f_T が出現する。一方、グラウトが未充填であると、f_T の他に打撃面とグラウト未充填との間で多重反射した波の共振周波数 fv も周波数スペクトル上に出現する。この２つのピーク f_T および fv は、各々次の２つの式で求めることができる。

写真−2.2　インパクトエコー法の測定装置

写真−2.3　測定状況

$$f_T = Vp / 2T$$

$$f_v = Vp / 2d$$

ここに、

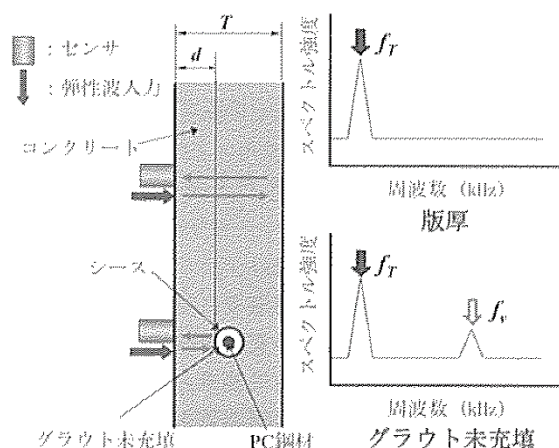
Vp：コンクリートの弾性波伝播速度

T：コンクリートの部材寸法

d：打撃面からシース表面までの深さ

図−2.5　グラウト充填不良の評価原理

測定評価は、①上記2式に事前に測定したシース表面までの深さ（d）とコンクリートの弾性波伝播速度を代入し、グラウト未充填の場合に出現するピーク位置をあらかじめ求める、②衝撃弾性波を入力して共振周波数のスペクトルを求める、③未充填と想定して①で求めたピーク位置が②の測定結果で出現すればグラウト未充填と判定することにより行う。

評価にあたっては、シースのかぶりから想定される周波数帯域に出現するピークにより充填、未充填の判断を行うが、測定者の経験や個人差が生じる可能性があり、装置面での改善が必要である。また、シースの断面形状によっては弾性波の反射効率が異なること、直径が40mm程度の細径のシースが使用されている場合にはグラウト充填不良が存在しても明瞭な縦波共振が生じ難いといった問題点がある。

2.2.3　超音波法

超音波法がコンクリートに適用されたのは、1950 年前後であり、Leslie および Cheeseman が Soniscope を用いてダムの調査[2-6]を行ったのが嚆矢とされる。Jones による Ultrasonic　concrete tester に関する研究を経て[2-7]、1970 年代に携帯型の Pundit が開発され、超音波法が普及・実用化した[2-8]。

超音波伝播速度とは、通常、超音波の縦波速度を指す。横波や表面波は判別し難いため使用されることはほとんどない。超音波法による標準的な計測システムの例を**図-2.6** に示す。

超音波法で使用する弾性波の周波数は 20kHz 以上であり可聴域よりも高いものが用いられる。弾性波は主に圧電効果を利用した振動子の機械的な振動によって発振され、受振は、弾性波形を電圧信号に変換する機能を持つ振動子で行われる。

発受振子の配置は、**図-2.7** のように、目的に応じて伝播速度や透過波の周波数の測定が最適条件となるように行う[2-4]。

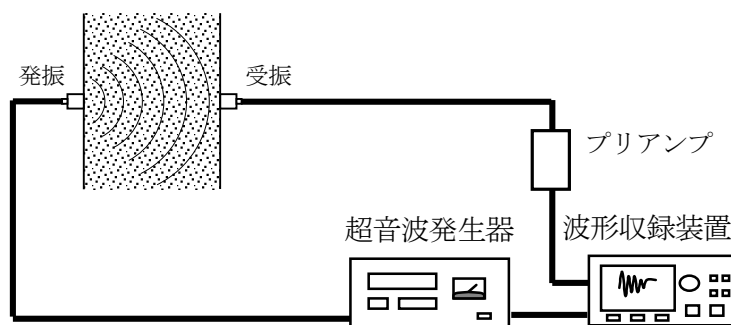



図-2.6　超音波計測システムの例

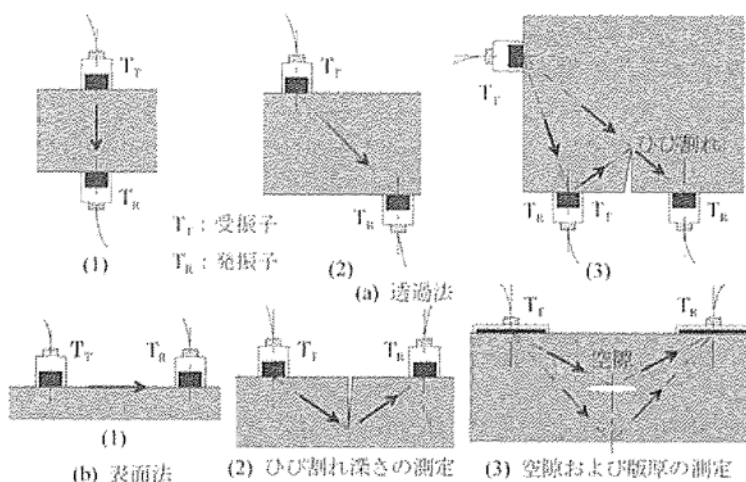



図-2.7　発受信子の配置例[2-4]

(a) 透過法

(1)対称法：最大の感度が得られ　伝播距離を正確に測定できる

(2)斜角法：コンクリート構造物の表面損傷部の深さ測定に用いられる

(3)斜角法：マスコンクリートの品質、隅角のひび割れ深さの測定に用いられる

(b) 表面法

(1)床版やマスコンクリートの表面伝播速度の測定に用いられる

(2)ひび割れ深さの測定に用いられる

(3)空隙や版厚の測定に用いられる

ＰＣグラウトの充填状況調査への適用に関して述べる。坂田ら[2-9]が表面法の適用を試みている。

発振子と受振子をシース直上コンクリートの同一平面上に設置して弾性波の発振および受振を行い、受振された波のピーク周波数の違いによりＰＣグラウト充填評価を行う。ＰＣグラウトが充填されている場合には、弾性波がシース内部のＰＣグラウトを通過してコンクリート表面と底面とで多重反射を繰り返すため、版厚に相当する縦波共振周波数の位置にピークが現れるが、ＰＣグラウトが充填されていない場合には、弾性波がシースを迂回して伝播するため、ＰＣグラウトが充填された場合と比較して、若干小さい周波数位置でピークが認められる。低周波領域のスペクトルのピーク位置の変化を把握することでＰＣグラウト充填の有無を評価するものである。ただし、入力する弾性波の波長が小さいため、シースおよび近接鉄筋の影響を受けて弾性波に反射が生じること、またコンクリート中における超音波の減衰が大きいため、部材厚さが大きい構造物には適用が困難であり、実構造物への適用には解決すべき課題が残されている。

超音波伝播速度の変化に着目した研究も行われている。ポストテンション桁の一部から水漏れが生じており、グラウトの未充填の可能性が指摘され、**図-2.8** に示す方式で超音波伝播速度を測定した結果を**図-2.9** に示す。測定後に削孔して検証した結果、空洞位置と、超音波伝播速度の測定結果が

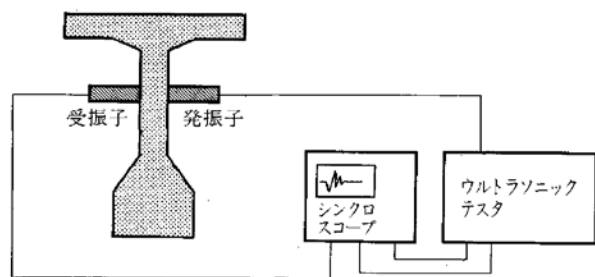



図-2.8 超音波パルス伝搬速度測定方法

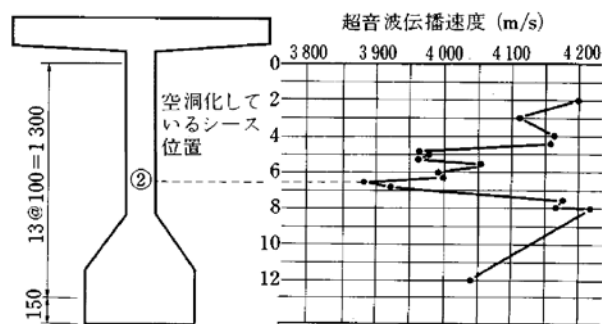



図-2.9 桁内部に存在する空隙による速度低下

整合していることが確認されており、未充填部の推定が可能であることが把握できた事例である。ただし、空洞シース位置では伝播速度が他の測点より小さくなっているが、低下量は100m/sec 程度であり、隣接する測点に比べて 100/4000＝2.5%程度の変化しかなく、したがって速度差からだけでは、空洞部を見落とす危険性があると考えられる。

これに関して鈴木ら[2-10]は、**図-2.10** に示す装置構成で試験した結果、**図-2.11** に示した結果のように、スペクトロスコピーを用いれば、超音波伝搬速度が１%程度しか低下しない場合でも、応答関数の最大エネルギーで比較すれば 50%ほどの低下を認めることができると報告している。ただし、供

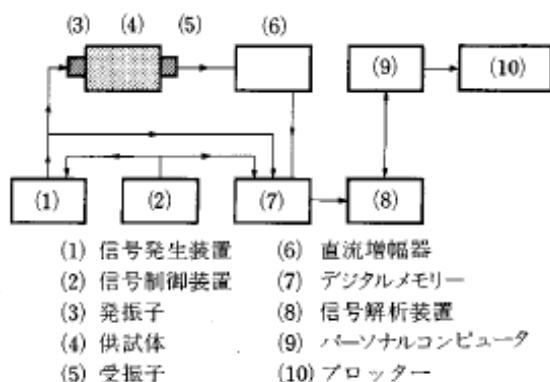



図-2.10 測定装置の構成[2-10]

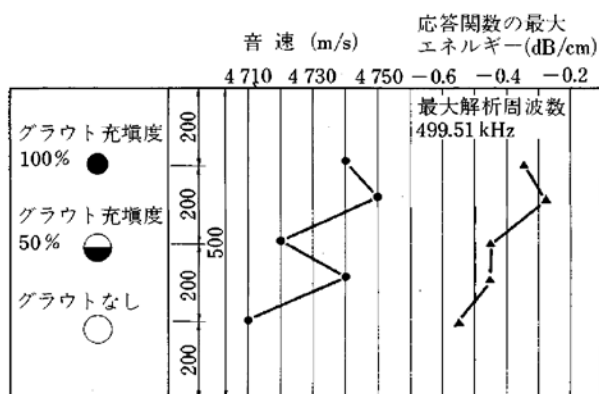



図-2.11 グラウト充填状況と音速および最大エネルギー変化[2-10]

試体での実験により得られた結果である。

アルカリシリカ反応に精力的に取り組んできた阪神高速道路公団（現、阪神高速道路株式会社）では、一連の詳細な検討結果から、構造物内部のコンクリートの性状把握という目的に対しては超音波法が適していると判断し、アルカリシリカ反応の影響を受けたコンクリート構造物の劣化の進行状況を把握する手段として、「伝播速度を指標とする経時変化」を維持管理における重要な指標として活用している[2-11]。ただし、構造物内部で進行している微細なひび割れの影響などを加味した断面内部の劣化進行状況を把握するには精度が不十分である。

ＰＣグラウトの充填不良に関しては、広帯域超音波法を用いた検討[2-12]もなされている。従来の超音波法では単一周波数を用いていたのに対し、広帯域超音波法では５kHz～約700kHz と帯域の広い周波数を入力し、コンクリート内部の鉄筋、骨材、シースからの反射波やコンクリートの表面波等をすべて収録・解析する。入射された超音波は異なる物質の界面で反射する特性があり、空洞があるとそこでほぼ全反射し大きな反射波を発生するが、対象が密実であると反射率が低くなり、反射波も小さくなる。また、シースからの反射波は高周波帯域の波が支配的であるため、グラウトが充填されていないシースの場合は高周波帯域の波が受信される。一方、グラウトが充填されたシースの場合は、反射波には高周波帯域の波は少なく、低周波帯域の波が中心となる。このことを利用して、グラウトの充填状態を判断する方法である。測定概念を**図-2.12** に、測定結果の例を**図-2.13** に示す。

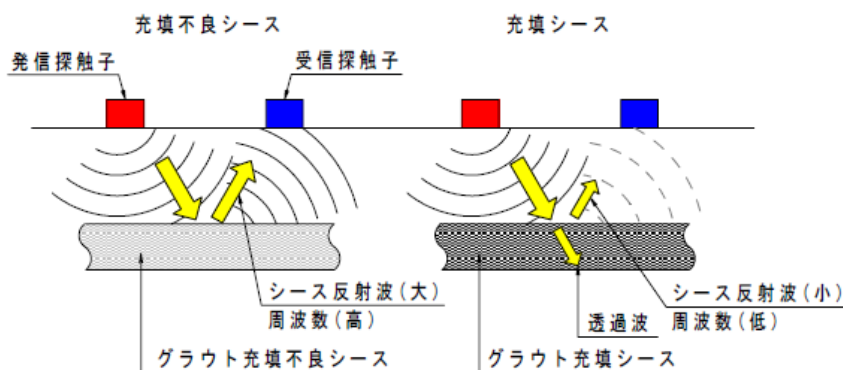
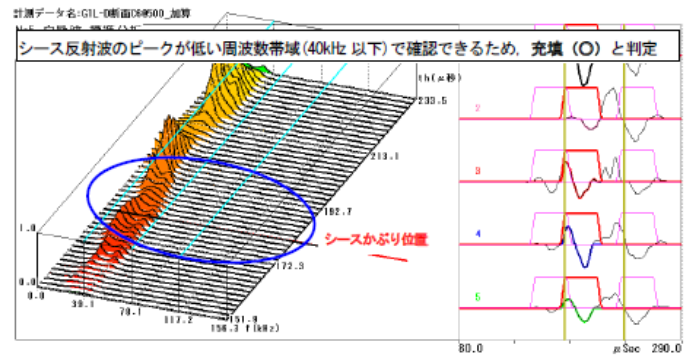
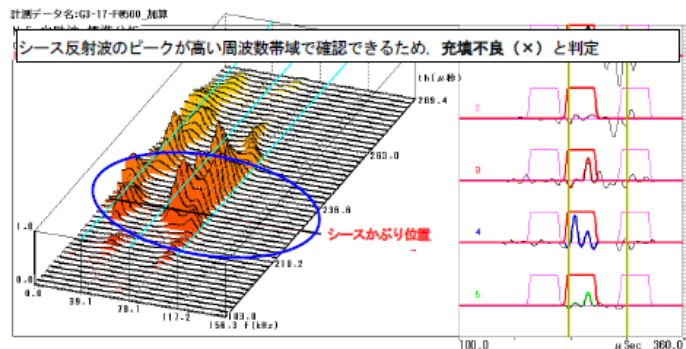



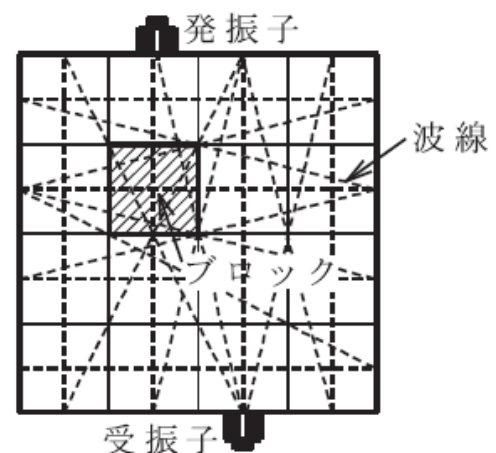
図-2.12 広帯域超音波法の測定概念図[2-12]

シースからの反射波のピークが低い周波数帯域（40kHz 以下）で確認できる場合と高い周波数帯域で確認される場合を示しており、この結果からグラウトの充填状況を判断するものである。

（a）充填（○）判定の例

（b）充填不良（×）判定の例

図–2.13　広帯域超波法によるグラウト充填状況判定例 [2-12]

2.2.4　超音波トモグラフィ法

さまざまな方向から対象物に光や電波などを入射し、その透過情報や散乱情報を基にマトリックス演算を行って、対象物内部の物理量などを導き出して画像を得る方法であり、断層撮影法などとも呼ばれることもある。超音波などを透過させて音速などの情報を得ようとすると、その始点から終点までの平均的な情報しか得られないが、**図–2.14** に概要を示したように、センサを数多く取り付けることで多くの方向から情報を取得し、これを基にマトリックス演算を行うことで逆問題の一種として内部の各点の情報を得ることができる。計算にはコンピュータを使うため，ＣＴ（computed tomography）と呼ばれることが多く，超音波ＣＴ，Ｘ線ＣＴなどが実用化されている。

コンクリート構造物に対しては、測定された超音波伝播速度を解析することで、構造物内部の欠陥位置を可視化して推定することが可能とされている。発振子から入射された超音波は、部材断面内に欠陥や空洞が存在した場合には、その欠陥を回避して回折して伝播するため、最短距離での伝播ではなく距離が長くなることから、健全部を直進した場合に比べて小さい見かけの伝播速度が得られる。このようにして求めた多方向からの超音波伝播速度を統計的に解析した結果、あるブロックの超音波伝播速度が他のブロック

図–2.14　トモグラフィ法の測定概要 [2-13]

での値よりも小さい場合に、そのブロックの位置に空洞あるいは欠陥が存在すると判断するものである。構造物内部の空洞評価のみならず、高強度コンクリートの均質性評価、火災による損傷を受けた構造物の火害度推定等にも活用されている[2-13]。

2.2.5 その他の方法

（1）Ｘ線透過法

人間が健康診断等で受診する胸部レントゲン撮影と同様、Ｘ線を利用してコンクリートの内部を観察する方法がＸ線透過法である。透過したＸ線量から、コンクリート中の鋼材位置、かぶり、空隙などの検出が可能である。Ｘ線は波長が1Å前後（おおむね $n \times 10^{2}$Å～10^{-2}Åの範囲）の電磁波であり、そのＸ線の線量を計測することでコンクリート内部の状況を可視画像として評価するものである。Ｘ線は物質を透過する性質を有し、フィルムなどの感光材料に当たった時に感光させる性質がある。感光材料に当たるＸ線量が強いほど濃度（感光材料の黒化度）が増す。感光材料に到達するＸ線の強さは透過する対象物の厚さや材質に大きく影響され、鉄鋼材料の場合はＸ線が透過しにくく、空洞等の気体はＸ線を透過させやすい。これらの特性から、コンクリート内の鋼材（鉄筋やＰＣ鋼材）は周囲に比べて白く写り、グラウト未充填部分等の空隙は黒く写るため、撮影された画像のコントラストの違いからグラウトの充填状況を識別することが可能となる。

国際医療放射線学会では、1981 年に人体への被爆線量を減らし、豊富な診断情報を提供する目的で従来のＸ線フィルムよりも高感度のＸ線検出プレート（ＩＰ：イメージングプレート）の開発が行われた。イメージングプレートに記録されたＸ線情報をレーザー光線で励起発光させて、いったん電気信号に変換し、コンピュータ処理を行って画像を得るものである。このＸ線画像処理システムは、医療分野のみならず、他分野にも応用されるようになり、コンクリート構造物の内部欠陥の検出にも使用されるようになった[2-14]。Ｘ線法によるグラウト調査例を**図-2.15** に、画像の例を**写真-2.4** に示す。Ｘ線の透過可能なコンクリートの部材厚さは、七里らの研究によれば 55 ㎝程度が限界であると報告されている[2-15]。また、日本コンクリート工学協会の報告では、高電圧発生装置とＩＰとを組み合わると、供試体実験ではあるがコンクリート厚さ 50cm と 70cm であっても、鋼線やグラウト充填状況を識別できたとされている[2-16]。しかし、このような厚みになると、コンクリートの散乱線によって十分なコントラストが得られておらず、診断には相当な注意が必要である。

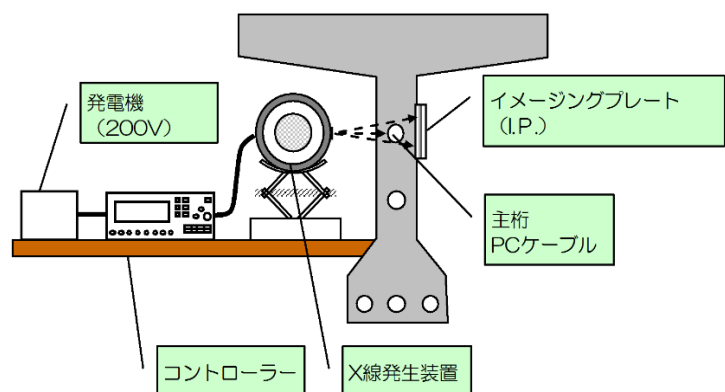



図-2.15 Ｘ線法（FCR：デジタルＸ線画像診断システム）によるグラウト調査例

グラウト：未充てん　　グラウト：充てん

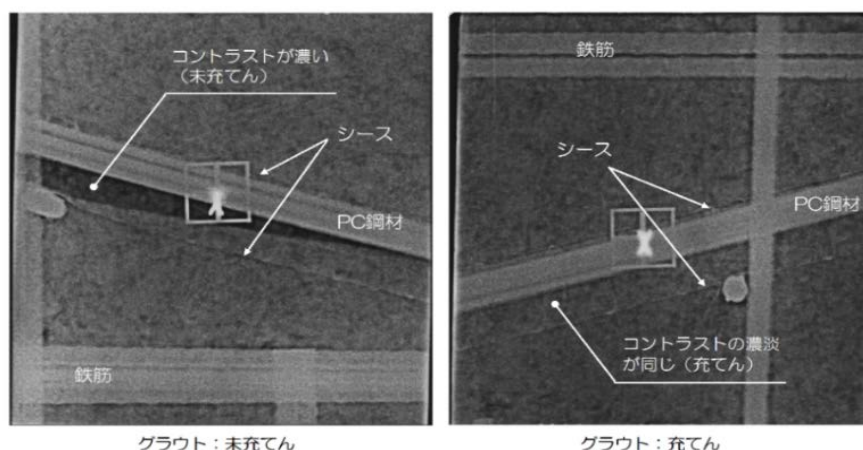



写真-2.4　Ｘ線法（FCR：デジタルＸ線画像診断システム）によるグラウト充填度診断事例

コンクリート部材厚により撮影に必要なX線照射時間が大きく異なる。**図-2.16**にコンクリート部材厚とＸ線照射時間の一般的な関係を示す。部材厚180㎜では照射時間は５分未満であるが、部材厚が500㎜のものでは120分程度必要となる。

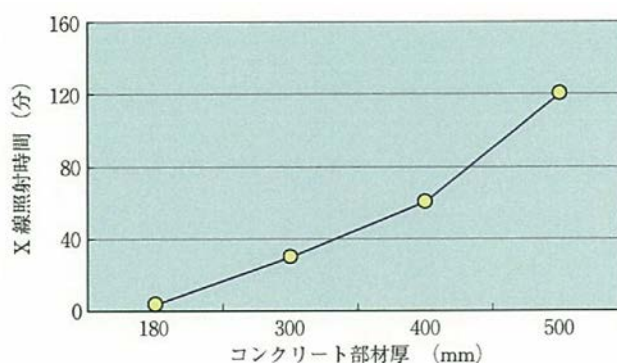



図-2.16　コンクリート部材厚と必要Ｘ線照射時間の関係 [2-5]

ＰＣグラウト充填不良調査への適用に関しては、鉄筋とシースが交錯する場合の識別、写真の濃淡がグラウト充填状況によるものか、あるいは撮影条件や画像解析条件によるものかの判断が難しい場合もある。さらに、供用中の構造物への適用を想定すると、放射線保護のための安全管理上の制約、測定コストが高く、Ｘ線照射時間が長くなるなど、試験効率が低下することもあり、適用にあたっては留意する必要がある。

(2) 磁力共鳴法

森ら[2-17]は、パルス状の磁力を用いたＰＣグラウト未充填検査を試みた。鉛直グラウトが完全に入っていないケースを検出対象とした測定技術である。磁力共鳴法の測定原理を**図-2.17**に示す。鉛直ＰＣ鋼材において、ＰＣグラウトが未充填である場合、ＰＣ鋼材に衝撃力あるいは周期荷重を与えると、ＰＣ鋼材は弦のように振動を起こす。ＰＣ鋼材がたわみ振動を生じると、ＰＣ鋼材の張力は変動し、ＰＣ鋼材の端部が振動する。

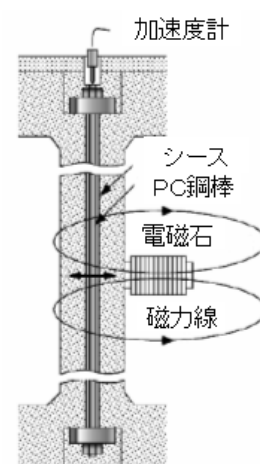



図-2.17　磁力共鳴法の測定原理 [2-17]

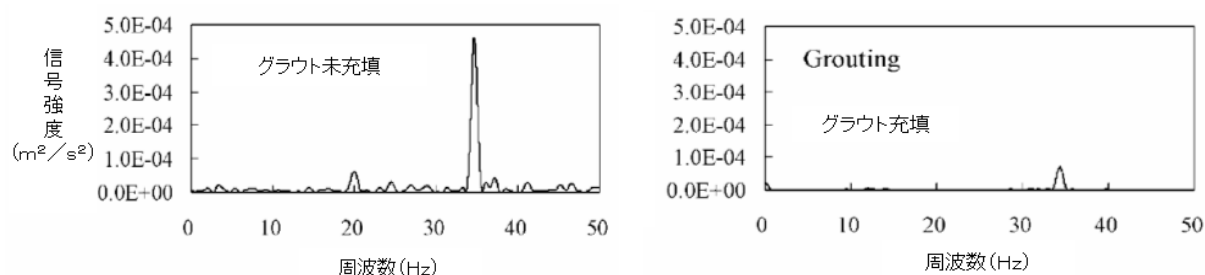
この端部の振動を検出することによってＰＣグラウト充填評価をする試みがなされている。ＰＣ鋼材の振動の基本振動数fは弦の基本振動数から次のように求めることができる。

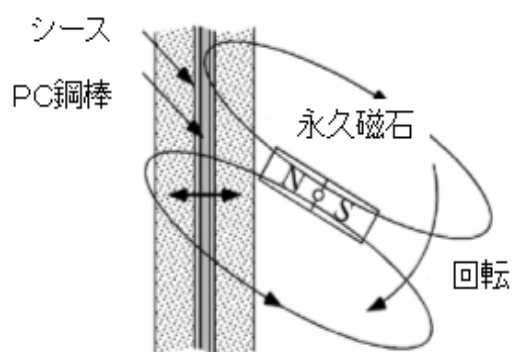
$$f = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{T}{\mu}} \qquad (2.1)$$

ここで、T：ＰＣ鋼材の張力（N）、L：ＰＣ鋼材の長さ（m）

μ：ＰＣ鋼材の単位長さ当たりの質量（kg/m）

これを用いてＰＣグラウト未充填時のＰＣ鋼棒の固有振動数を求める。ＰＣグラウト未充填の場合、式（2.1）で求めた周波数の磁力を入力するとＰＣ鋼棒に共鳴現象が生じ、ＰＣ鋼棒は大きく振動するため、周波数分布においてＰＣ鋼棒の振動に相当するピークが卓越して発現する。一方、ＰＣグラウトが充填されている場合は、ＰＣ鋼棒はＰＣグラウトによって振動を抑制されているため、共鳴現象は生じず、ＰＣ鋼棒の振動に相当するピークは卓越して発現しない。

ＰＣ鋼棒の固有振動数に相当する磁力を入射したときのＰＣ鋼棒端部の半径方向速度のパワースペクトル測定結果を、グラウトの充填有無で比較すると、**図–2.18** に示すように明確な差異が認められる。このことから、グラウトの未充填が判断できるとする方法である。

図–2.18　35Hz の磁力を入射したときのＰＣ鋼材端部の半径方向のパワースペクトル [2-17)]

室内試験の結果、磁力によりＰＣ鋼棒に振動を生じさせてグラウト充填の有無を把握できることが示された段階であり、実際の構造物への適用に関しては、大きく分けて２つの課題が残されている。ＰＣ鋼材は端部が頑強に固定されているので，端部での振動の大きさは室内試験の結果よりも小さくなることが予想される。磁力強度を増す検討が必要であり、直流電流を用いた電磁石や永久磁石を用いる方法も提案（**図–2.19**）されている。また、ＰＣ鋼材はＰＣ構造物の比較的深い位置に配置されているため、磁気による加振が

図–2.19　永久磁石を用いた ＰＣ鋼材の加振方法 [2-17)]

どの程度の深さまで可能かの検証も必要である。原理的には可能であるが、実用面での課題が残されている方法である。

(3) 電磁パルス法

電磁パルス法では、非接触で鋼材（鉄筋、ＰＣ鋼材）に衝撃を与えるために励磁コイルを使用する。このコイルは、電磁鋼板にマグネットワイヤを巻き付けたもので、パルス状の電流を流すことによりコイル周辺に瞬間的な磁界を発生させることができる。この磁界で生じた電磁力によりコンクリート内部に存在する磁性体に振動を付与し、磁性体の振動により生じた弾性波をコンクリート表面に設置したセンサで受振し、受振波の最大振幅値により磁性体の状態やその界面の欠陥を非破壊で評価する手法であり、ＰＣグラウトの充填評価[2-18]、鉄筋破断の評価[2-19]に適用する検討が行われている。装置の構成例を**図-2.20**に示す[2-19]。

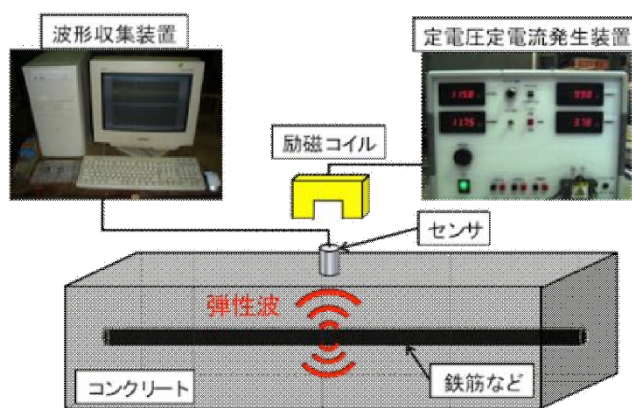



図-2.20　電磁波パルス法の装置構成例[2-19]

ＰＣグラウトが充填されている場合、パルス状の磁力をコンクリート表面から非接触で入力すると、励磁コイル直下のシースが主に振動する。このとき、シースはＰＣグラウトによる拘束の影響を受けるため、シースの振動はさほど大きなものとはならない。また、磁気遮へい効果によりシース内部のＰＣ鋼棒はほとんど振動しない。一方、ＰＣグラウト未充填の場合、ＰＣグラウトによる拘束がないため、シースの振動は大きくなり、その大きさは明らかにＰＣグラウト充填の場合のそれと比較して大きくなる。したがって、コンクリート表面に設置したセンサでこの振動をとらえ、最大振幅値を比較することによりＰＣグラウト充填評価を行うものである。測定結果の例を**図-2.21**に示す[2-18]。ただし、グラウト充填箇所と未充填箇所における最大振幅値の差が小さいため、判断が困難な場合も多々認められ、改善が必要である。

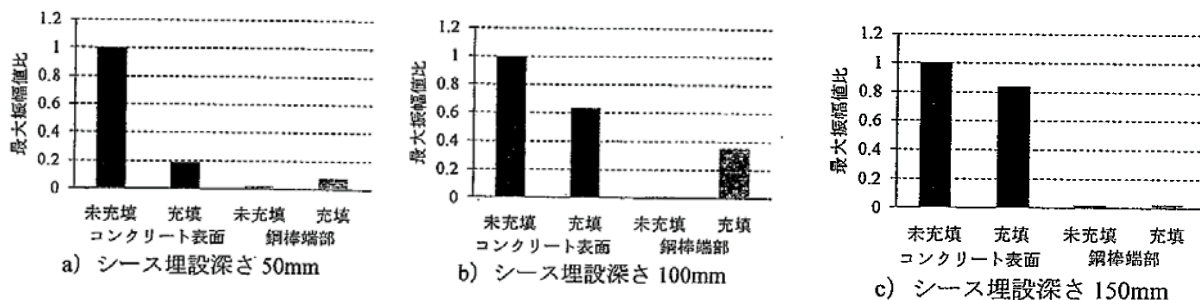



図-2.21　電磁パルス法による測定結果の例[2-18]

2.3　本論文でとりあげる非破壊検査方法

2.2 節において、本論文の研究課題に適用しうると考えられる各種非破壊検査手法の現状を示した。本項では、各研究課題に対するそれら非破壊検査方法の適用可否に関する総合的な検討を行う。

2.3.1　ＰＣグラウト充填不良に対する非破壊検査方法

ＰＣグラウトの充填状況評価に適用可能と考えられる各種非破壊検査手法として、Ｘ線透過法、超音波法、磁力共鳴法、電磁パルス法、衝撃弾性波法およびインパクトエコー法を選定し、それらに対して、測定原理の簡明さ、アウトプットの迅速さおよび信頼性、装置の価格を含むコストの観点から評価を加えた結果を、**表-2.3** に示す。

表-2.3　ＰＣグラウト充填不良に対する非破壊検査方法

調査方法	原理の簡明さ	アウトプットの迅速さ	アウトプットの信頼性	装置の価格を含むコスト	総合評価
Ｘ線透過法	○	○	○	×	△
超音波法	○	○	△	○	△
磁力共鳴法	△	△	△	(—)	△
電磁パルス法	△	△	△	(—)	△
衝撃弾性波法	○	○	○	○	○
ｲﾝﾊﾟｸﾄｴｺｰ法	○	○	○	○	○

※ 装置の価格評価：試作レベルは（ — ）とした

Ｘ線透過法は、原理の簡明さおよびアウトプットの迅速さの面からは高い評価を与えることができるが、放射線被爆防止のための安全管理と測定可能な部材厚さに制約がある。また、全体像を把握するためには多くの撮影枚数を必要とすること、画像の濃淡からグラウトの充填有無を判断するには読解力を必要とすることも問題点として挙げられる。

超音波法は、原理の簡明さ、アウトプットの迅速さおよびコスト面での評価は十分であるが、アウトプットの信頼性の面で評価が低い。磁力共鳴法および電磁パルス法は、試験室レベルでは比較的良い結果が得られているものの、実構造物対象という面では高い評価を与えることができない。衝撃弾性波法およびインパクトエコー法に関しては、原理の簡明さとコスト面での評価は満足すべきレベルであり、アウトプットに関しても、解明すべき点は残されているものの、実用に値する調査手法であると判断できる。

2.3.2　アルカリシリカ反応が顕在化した構造物の内部コンクリートの劣化に対する非破壊検査方法

アルカリシリカ反応が顕在化した構造物内部のコンクリートの状態を把握する手法としては、現状、超音波法以外の手法は技術的可能性が低いと判断される。超音波法として検討対象とする、超音波

トモグラフィ法および超音波斜角法の適用性評価を**表−2.4** に示す。

表−2.4　アルカリシリカ反応が顕在化した構造物の内部コンクリートの劣化に対する非破壊検査方法

調査方法	原理の簡明さ	アウトプットの迅速さ	アウトプットの信頼性	装置の価格を含むコスト	総合評価
超音波トモグラフィ法	○	△	△	○	○
超音波斜角法	○	○	△	○	△

2.4　本章のまとめ

本章では、コンクリート構造物の維持管理上、とくに内部の変状状態が問題として取り上げられる機会の多い、①ポストテンション方式ＰＣ構造物のグラウト充填不良の評価、②アルカリシリカ反応が顕在化した構造物内部のコンクリートの状態を評価できる非破壊試験技術の現状を整理した。

2.3.1 および 2.3.2 項で、本論文で研究する課題に対し、各々適用しうると考えられる非破壊検査手法を示し、それらの適用性に関する筆者の判断を示した。評価にあたっては、実用化の可否に重点を置いて評価を加えた。

本研究における課題の解明手法として、下記枠内の手法を用いて、３章および４章で詳細な検討を行うこととした。

・ＰＣ構造物のグラウト充填状況調査　：　衝撃弾性波法、インパクトエコー法
・アルカリシリカ反応が顕在化した構造物内部の劣化調査
：超音波斜角法、超音波法トモグラフィ法

上述の衝撃弾性波法、インパクトエコー法、超音波斜角法、超音波トモグラフィ法はいずれも弾性波法に分類される非破壊検査法である。
1 章の 1.2 項において非破壊検査技術の本来有るべき姿として、以下の３点を示した。

１．簡単な原理であること
２．直ぐに答えが出ること
３．装置がなるべく単純で、安価であること

「弾性波法」は、この３つの条件にあてはまる「非破壊検査技術」を開発する可能性が最も高い手法だと考えられる。弾性波法は、その伝播特性を「伝播速度」「振幅」「周波数」の３通りで表現できる。伝播経路や弾性係数の変化の影響を受ける「伝播速度」、反射や散乱などの減衰により変化する「振幅」、伝播経路における欠陥の大きさ、分布状況や反射、散乱の影響を受ける「周波数」といった伝播特性である。対象とするコンクリート構造物が弾性体であると見なせることから、弾性波の入力方法や、出力の捉え方を的確に組み合わせれば、各種の欠陥を把握することが出来る手法であると考えている。

３章では、ＰＣ構造物のグラウト充填調査を検討対象とし、横締めＰＣ鋼材のグラウト充填状況評価を衝撃弾性波法で、縦締めＰＣ鋼材のグラウト充填状況評価をインパクトエコー法で検討する。

４章では、アリカリシリカ反応が顕在化した構造物の内部コンクリートを検討対象とし、斜角法超音波測定によりひび割れ深さを、また超音波トモグラフィ法により内部コンクリートの劣化状況を検討することとした。

【参考文献】

2-1)　土木学会：2013 年制定　コンクリート標準示方書[維持管理編]、pp. 43、2013

2-2)　土木学会：弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告書およびシンポジウム論文集, コンクリート技術シリーズ 61, 2004

2-3)　鎌田敏郎、内田慎哉：コンクリートの非破壊試験の理論と実際　③弾性波法（超音波法・衝撃弾性波法）の理論と実際、コンクリート工学、Vol. 51、No. 4、340-347、2013. 4

2-4)　土木学会 関西支部：コンクリート構造の設計･施工・維持管理の基本、平成 26 年 9 月

2-5)　真鍋英視、葛目和宏、鎌田敏郎、木村嘉富：非破壊検査技術を用いたＰＣグラウト充てん度の評価、コンクリート工学、Vol. 48、No. 6、18-24、2011

2-6)　Leslie, J. R, and Cheesman, W. J.　: An ultrasonic method of studying deterioration and Cracking in concrete structures、P. ACI. 46、1949

2-7)　Jones, R : The　non-destructive testing of concrete、Mag. of Concrete Research、No. 2、 1949

2-8)　明石外世樹：コンクリートの非破壊試験に関する研究、土木学会論文集　第 390 号／V-8、1988. 2

2-9)　坂田康徳、大津政康：超音波スペクトロスコピー法によるポストテンションＰＣ構造物のグラウト充填度評価、コンクリートの非破壊試験法に関するシンポジウム論文集、pp. 87-92、1991

2-10)　鈴木健司、尼崎省二：応答関数によるコンクリートの品質評価について、土木学会第 43 回年次学術講演会講演概要集、第 5 部、pp. 430-431、1988. 10

2-11)　松本　茂：アルカリシリカ反応を生じた道路橋コンクリート橋脚の維持管理手法に関する研究、京都大学学位論文、2014. 9

2-12)　天谷公彦、福永靖雄、原　幹男、濱岡弘二、木下尚宣：広帯域超音波法を用いたグラウト充填調査システムの開発、第 1 回北陸橋梁保全会議資料、pp. 337-340、2013. 11

2-13)　木村芳幹：超音波トモグラフィ法によるコンクリート構造体品質の推定、ＧＢＲＣ、Vol. 33、No. 2、2008. 4

2-14)　横野泰和：1999 年度の標準化委員会活動報告、非破壊検査、Vol. 49、N0. 8、pp. 528-531、2000. 8

2-15)　七里知之、吉田輝之：X 線によるＰＣ主ケーブル調査法の研究、土木学会第 51 回年次学術講演会概要集、Ⅰ-A413、pp. 826-827、1996

2-16)　(社)日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会報告書、pp.172-173、2001.3

2-17)　森和也、鳥越一平、畑中俊治：磁力共鳴法によるグラウト未充填の検出、コンクリート工学年次論文集、vol.27、No.1、pp.1783-1788、2005

2-18)　角田蛍、鎌田敏郎、内田慎哉、宗像晃太郎、稲熊唯史、弾性波によるＰＣグラウト充填評価手法への電磁パルス法の適用に関する基礎研究、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、第9巻、pp.39-44、2009

2-19)　内田慎哉、壊さずに社会基盤施設の健康状態を知る非破壊試験、立命館大学 理工学部 建設保全工学研究室HP、2014年2月

第３章　ＰＣグラウト充填状況の非破壊検査方法

ＰＣ構造物のうち、長大橋梁で多く使用されているポストテンション方式のＰＣ桁では、シース内にＰＣ鋼材を配置して、緊張力を付与した後、シース内の鋼材をグラウトで完全に覆うことが重要である。これによってＰＣ鋼材の防食を図るだけでなく、コンクリートとＰＣ鋼材の一体化を実現させるもので、シース内の空隙はグラウトによって完全に充填されている必要がある。

しかし、わが国では 1970 年代にポストテンション方式の構造物が多く作られたが、グラウトを完全に充填することに十分な配慮がなされなかったため、シース内にグラウトが完全に充填されていない事例もあるようである。

橋梁構造物では、ポストテンション方式で建設されたＰＣ構造物のグラウト充填の良否が、安全性、使用性、第三者影響度に大きな影響を与える因子である。したがって、ポストテンション方式で建設されたＰＣ構造物の物維持管理においては、グラウト充填不良部が原因となる変状が発生しないようにすることと、それが進行して構造上の欠陥とならないような点検と対策の実施が、重要な課題であると言える。

また、ＰＣ鋼材は橋梁軸方向（縦方向）と橋梁軸直角方向（横方向）とに配置されており、**図-3.1** のＰＣ　Ｔ桁橋におけるＰＣ鋼材配置に示すように、その役割やＰＣ鋼材径および長さ、部材内の位置も異なるため、グラウト充填状況を点検する方法も、それに適合するものが求められる。本文では、点検対象を横締めＰＣ鋼材と縦締めＰＣ鋼材とに分け、それぞれの非破壊調査方法として、衝撃弾性波法とインパクトエコー法とを取り上げた。

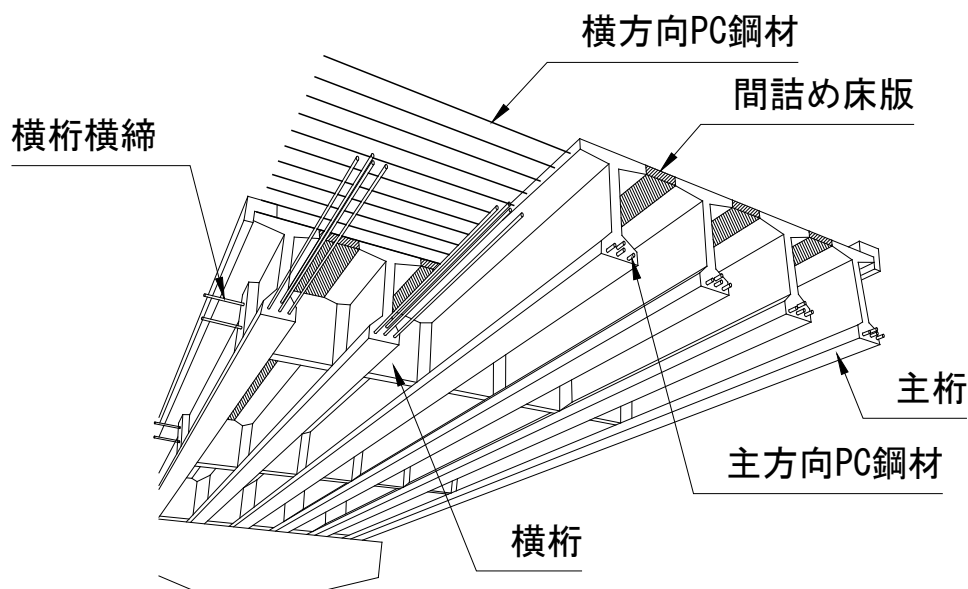



図-3.1　Ｔ桁橋におけるＰＣ鋼材配置図

3.1　横締めＰＣ鋼材の衝撃弾性波法によるグラウト充填状況調査

シース内部のグラウト充填状況をＰＣ鋼材を傷付けずに評価するためには、非破壊試験法に頼らざるを得ない。現状では、削孔をともなう局部破壊法やＸ線法等が有力な評価手法として採用されているが、車両の運行を妨げずに行えること、かつ点検すべき箇所の膨大さから考えて、作業性や費用を考慮すると、これらは必ずしも満足のいく評価法であるとは言えない。

そこで、簡便かつ安価に測定を行うことができる衝撃弾性波法を用いたグラウト充填状況評価手法が検討されるようになってきた。調査手法としては、主に**図-3.2** のように２つに分類され、①弾性波をＰＣ鋼材軸方向に伝播させる方法と、②弾性波をＰＣ鋼材軸直角方向に伝播させる方法とがある。

①PC 鋼材軸方向に伝播させる方法

②PC 鋼材軸直角方向に伝播させる方法

図-3.2　衝撃弾性波の調査手法

弾性波をＰＣ鋼材軸方向に伝播させる手法は、前節で述べたように、ＰＣ鋼材両端の定着具近傍にセンサを取り付け、片側の定着具近傍をハンマ等で打撃し、その発振信号と受振信号とを測定し、分析するものである。主に既設構造物の横桁横締めや床版横締めを対象に用いられており、実績を重ね、既往の研究報告からも、ＰＣ鋼材全長にわたる平均的なグラウト充填状況を判断する場合に実用的な調査手法であると言える。またこの方法は、ＰＣ梁橋脚の梁部分の鋼材グラウト充填状況を調査する方法としても有用である。

3.1.1　衝撃弾性波法のＰＣ上部工への適用

1994 年に自動車専用高速道路高架橋の横桁から、ＰＣ横締め鋼棒が破断して突出し、側道橋に落下して、走行中の自動車に当たるという事故が発生した。この橋梁の上部工は 1970 年に建設されたプレテンション方式のＴ桁橋で、床版横締めおよび横桁横締めにφ23㎜のＰＣ鋼棒、φ35㎜のシースが使用されていた。事故は幸い物損だけであったが、事故発生後、直ちにこの橋梁全体の床版横締め、横桁横締め定着部を対象に詳細点検が実施され、次のようなことが判明した [3-1]。

① 破断したＰＣ鋼材には、グラウトの形跡がなかった。

② ＰＣ鋼材の破断は、腐食による応力集中が起因となり、遅れ破壊が発生したものである。

③ 塩化物や硫酸イオンがＰＣ鋼材の錆から発見された。

④ 隣接する同形式の橋梁（延長 3.4km）から、２本の横桁横締めと４本の床版横締め鋼材の破断が検出された。

これらの結果より、横締めＰＣ鋼棒の破断、突出の原因は、横締めＰＣ鋼材に対するグラウト充填が完全ではなかったため、シース内の空隙部分に雨水や凍結防止剤等が浸入して、錆を発生させたためではないかと結論付けられた。

横締めＰＣ鋼材の破断は、橋梁上部工を横方向に一体化させる力を低下させて、間詰床版部の

抵抗力が低下して床版の抜け落ちを発生させるだけでなく、道路軸直角方向にＰＣ鋼棒が飛び出すことがある。また、その衝撃で定着部の後埋めコンクリートが破損し、コンクリート片が路下に剥落して、通行者に対して第三者影響を及ぼす危険性も高い。このような横締めＰＣ鋼材破断が原因となって発生する橋梁の性能低下を防ぎ、第三者影響を未然に防止するためには、早急に、グラウト未充填部を探し出して、再充填することでＰＣ鋼材の腐食発錆を防ぐという、根本的な対策を実施する必要性については論を待たない。

写真-3.1　横締めＰＣ鋼材の飛び出しが発生した橋梁外観

跨線橋や跨道橋だけでなく、高架橋ではＰＣ上部工が採用されているだけでなく、橋梁が長く、そこに配置されている横締めＰＣ鋼材の数も多いことから、なるべく簡便な非破壊試験で、グラウト充填状況を推定する方法の開発が急務となった。

(1) 供試体を用いた基礎実験

当時は、ＰＣ構造物の横締めＰＣ鋼材や横桁横締めＰＣ鋼材を対象に、それらのグラウト充填状況を評価した実績のある方法がほとんどなかった。胸部Ｘ線写真のようにシースを撮影できれば、グラウト充填状況も識別できるのではないかと考えてＸ線法を、また非接触でコンクリート内部の空洞の有無が分かればと考えて赤外線法を、さらにコンクリート表面を打撃することで空洞の有無を判別できないかと考えて衝撃弾性波法等を取り上げ、それらの有効性について**図-3.3**、**図-3.4**に示すような供試体を作成して実験するとともに、実際の橋梁でも試験的に使用して、現場適用性を検討した。また、この供試体はＰＣ鋼棒が破断した橋架のＰＣ上部工を小型化したもので、ＰＣ鋼材飛び出しに関するグラウト充填状況、鋼材種別との関係や、飛び出し防止対策等に関する基礎実験等を行った。なお、グラウト充填状況は**図-3.3**に示すように、０％、50%、100%の３種類とし、ＰＣ鋼材はＰＣ鋼棒、ＰＣ鋼より線の２種類とした。

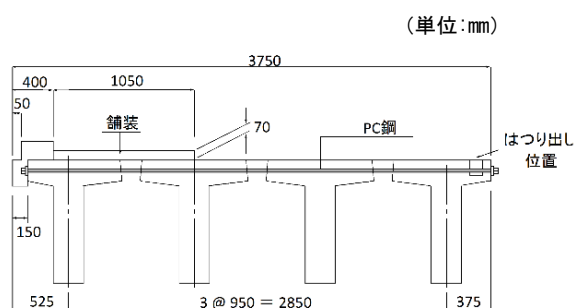



図-3.3　供試体断面

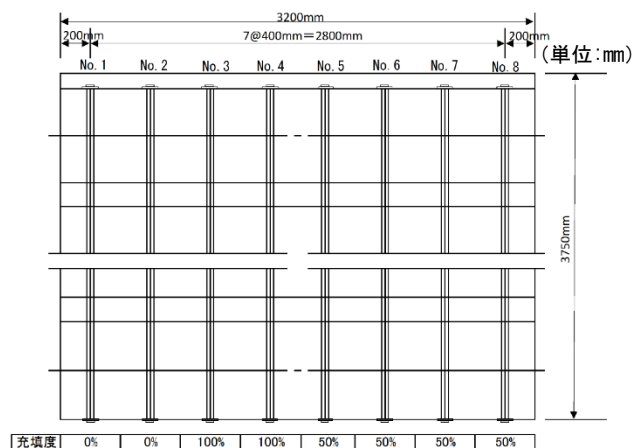



図-3.4　供試体平面

グラウトの充填状況を先の３種類に変化させ、緊張したＰＣ鋼材をガスで切断して行った実験結果の中から、鋼材の飛び出し事故に係わる事項を取りまとめると以下のようになった。

① ガスでＰＣ鋼棒を切断すると緊張力が一気に解放され脆性的に破断するが、ＰＣ鋼より線では周囲の線材が１本ずつ破断するので、鋼材破断が飛び出す事故に直結する可能性は低いと考えられた。

② グラウト充填状況０％では、ＰＣ鋼棒は破断すると後埋めコンクリートが破損し、ＰＣ鋼棒が飛び出すが、グラウトが 50%、あるいは 100%充填されていると飛び出しは生じなかった。

③ 床版部でも、横桁部でも、後埋めコンクリート表面にガラスクロスを張り付けるだけでは、飛び出しを防止できなかったが、薄い鉄板を敷いた上に炭素繊維シートを張り付けると、鉄板がＰＣ鋼棒の飛び出しエネルギを分散させる効果を発揮して、飛び出しを防ぐだけではなく、コンクリート片の飛散防止効果も持っていると考えられた。

1) Ｘ線法

Ｘ線透過法の概要を**図-3.5** に示す。道路橋床版を上下に挟み込むように、路面側にＸ線発信器と制御器を配置し、床版下面にＸ線フィルムあるいはイメージングプレートを配置する。このようにして、Ｘ線透過法では横締めＰＣ鋼材を撮影し、Ｘ線画像の濃淡でグラウト充填状況を評価することができる。この方法に関しては、2.2.6 で記述しているが、本論文では床版に適用できるのかを実証的に確認した。

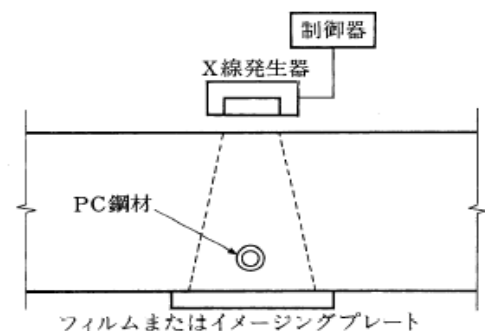



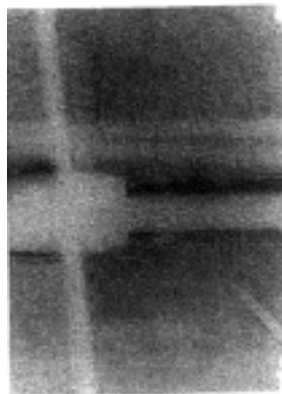
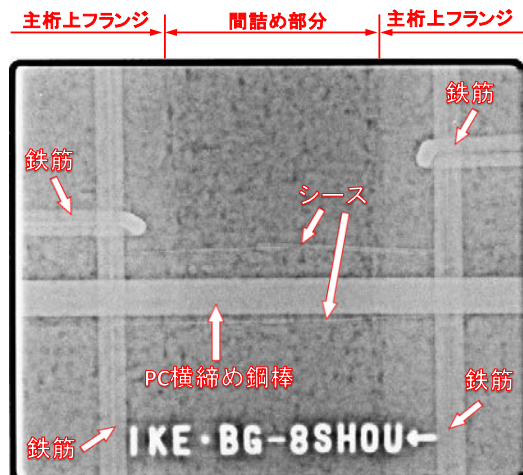
図-3.5 Ｘ線透過法概要図

一般に道路橋では、コンクリート床版にアスファルト舗装が施工されていることから、アスファルトを透過する時の散乱線への対応が必要になり、経験の少ないＸ線技術者では対応が難しく、床版と合わせても透過厚さは 30cm 未満と想定されるが、鮮明な画像が得られ難いのが実情である。また床版内の鉄筋とシースが交錯する場合には画像からのシース内の識別が難しいことも多い。

また撮影現場では当然Ｘ線を使用することから、放射線被爆防止のため安全管理が必要になり、道路面を調査するために占有することから、手続きを含めて法令にしたがって慎重に作業しなければならない。

コンクリート構造物の非破壊検査手法の中でＸ線法は、試験法を熟知していない技術者でも試験結果を、まるで写真を見るかのように、画像の濃淡からシース内のグラウトの有無を判別できる可能性がある。しかし、写真の濃淡が、必ずしもグラウト充填状況だけでなく、撮影条件あるいは画像解析条件によって影響を受けた結果かどうかについても考察する必要がある。

写真-3.2、写真-3.3 は、床版横締めＰＣ鋼材のグラウト充填状況を、**図-3.5** のように床版を上下に挟む形で、Ｘ線法で撮影した例である。**写真-3.2** は、間詰部での横締めＰＣ鋼棒を撮影した

もので、カップラ周辺でグラウト未充填の部分のあることが分かる。**写真−3.3** は、最近の FCR で解析したもので、図の中央に左右水平に置かれている棒状のものがＰＣ鋼棒（φ20mm）で、それを囲むように薄い皮状のように写っているのがシース（φ30mm）である。また、上下に淡い黒帯のように見える部分は間詰部分で、その両側は主桁上フランジである。これは、細かい気泡までは密実なコンクリートに比べると黒っぽく写るので間詰部が暗いが、上フランジのコンクリートは間詰部に比べると明るく見えるので、間詰部のほうが主桁上フランジよりも密度が低いといえる。

写真−3.2

写真−3.3

このように、Ｘ線透過法で撮影した写真は、医療の健康診断で用いられる胸部Ｘ線写真と同じように、黒っぽい箇所は密度が小さい（＝グラウト未充填）、白っぽい箇所は密度が大きい（≒グラウトが充填されている）という判定基準を用いることができる。しかしＸ線の採用に当たっては、撮影位置だけの局部的なデータでしかないことや、床版を上下に挟む作業となるので交通規制が必要となる等、作業性やコスト等を考慮すると、多用はできないといえる。

2）赤外線法

ＰＣグラウト充填状況を赤外線法で点検するためには、シース内の空隙が撮影時の条件によって、コンクリート表面の局部的な温度変化となって現れることが必要である。コンクリート表面に近い位置に欠陥があれば、橋梁が暖められる日中前半では、空隙の温度上昇がコンクリート表面より遅れることから、周囲に対しては低温域となって現れる。逆に夕方からコンクリート表面温度が低下していく時間帯では、空隙の温度が下がる速度がコンクリート表面よりも遅れるため、高温部分として表示される。

赤外線法は構造物より離れた位置から非接触で広範囲の計測が可能という利点はあるが、シース内の空隙を温度変化として把えるには、空隙の位置や大きさ、表面からの深さを考慮すると、当時の赤外線装置の性能では判別は困難な段階にあった。

以上のように赤外線法は、ＰＣグラウト充填状況の点検においてはまだ実績が乏しいことから、定着部の後埋めモルタルの剥離や漏水の有無等を対象とした概略点検手法としては、有効である

と考えられるが、撮影時の気温や日射、風の影響等を反映させた撮影条件や赤外線解析方法を確立する必要があるとして、グラウト充填状況調査方法としては見送ることとなった。

3) 衝撃弾性波法

コンクリート表面において衝撃的な打撃により弾性波を入力し，２個の振動センサを用いてコンクリートを伝播する弾性波の立上りの到達時間を読み取る。２個の振動センサにおける立上りの到達時間の差が弾性波の伝播時間差となる。入力位置から２個の振動センサまでのそれぞれの距離の差を弾性波の伝播時間差で除して弾性波伝播速度を求めることが出来る。

図-3.6 は床版横締めを検討する供試体での衝撃弾性波の検証状況を示したもので、横締めＰＣ鋼材の定着部Ａの直上を目標に受振センサを、もう一方の定着部Ｂに発振センサを取り付けて、Ｂの近傍をハンマで打撃する。このようにコンクリート表面にセンサとしてＡＥセンサを取り付けるだけで、－コンクリートをはつらなくても測定できる－ことが、この方法の利点の１つである。上記で使用した測定機材は以下の通りである。

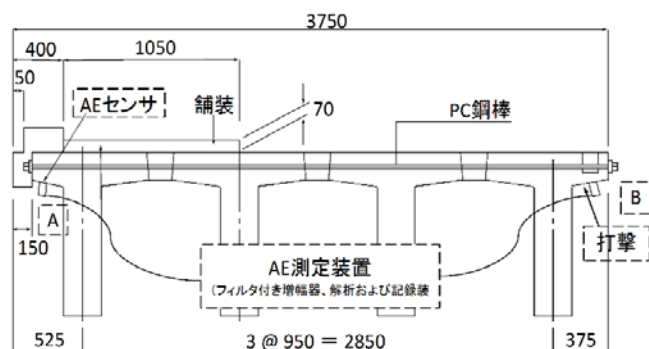



図-3.6　供試体での衝撃弾性波法の測定要領

【使用機器】　・センサ：AE センサ　AE-901S（エヌエフ回路設計ブロック社製）
　　　　　　　・増幅器：プリアンプ　9913（エヌエフ回路設計ブロック社製）
　　　　　　　・波形収録装置：メモリハイコーダ　8851　（日置電機㈱製）

衝撃弾性波法の測定結果からグラウト充填状況の判定基準を作成するために、実橋で３径間 72 本の横締め鋼材について、Ｘ線法やコアボーリングで確認した結果を正として弾性波測定結果と比較したところ、**図-3.7** のような結果が得られた。同図では(a)は十分にグラウトが充填されている場合で、(ｂ)は部分的に未充填がある場合、(c)はほとんどグラウトが充填されていない場合の典型的な測定結果を表している。例えば、(a)では受振波形の最大振幅は、0.3mV 以下で、周波数帯も 20kHz 以下となっているが、(c)では最大振幅が 80mV もあり、周波数帯も 20kHz を超えるものが大部分となっている[3-2]。

以上のような実橋での測定結果をまとめると、グラウト充填状況と伝播される弾性波のエネルギとの間には、充填状況が高くなると伝播されるエネルギが小さくなるという関係が見られる。衝撃弾性波法では、ハンマあるいはバネポインタでコンクリート表面を打撃しているが、入力された弾性波は近くのＰＣ鋼材の定着具を経由して、ＰＣ鋼材に伝わり、これがもう一方の定着具を介して、出力側のセンサに伝わっていると想定する。この場合、入力点から入力側定着版と、出力側の定着具と出力センサとの間ででも伝播経路のもつ特性が、伝播する弾性波に影響することが考えられるが、その距離は横締め鋼材の長さに比較すると短いことから無視できると判断す

る。このような前提条件を仮定すれば、衝撃弾性波法では横締めＰＣ鋼材を伝播してきた弾性波の特性が、コンクリート表面に設置した出力センサで検知できると考えることができる。

したがって、グラウトが充填されていなければ、出力された弾性波は定着具で固定されたＰＣ鋼材を伝わった弾性波の特性を示し、逆にグラウトが充填されていればグラウト材で覆われたＰＣ鋼材を伝わることになるので、振動エネルギは吸収されると考えられる。このようにグラウト充填状況が高くなるほど、伝播エネルギは小さくなると判断できる。

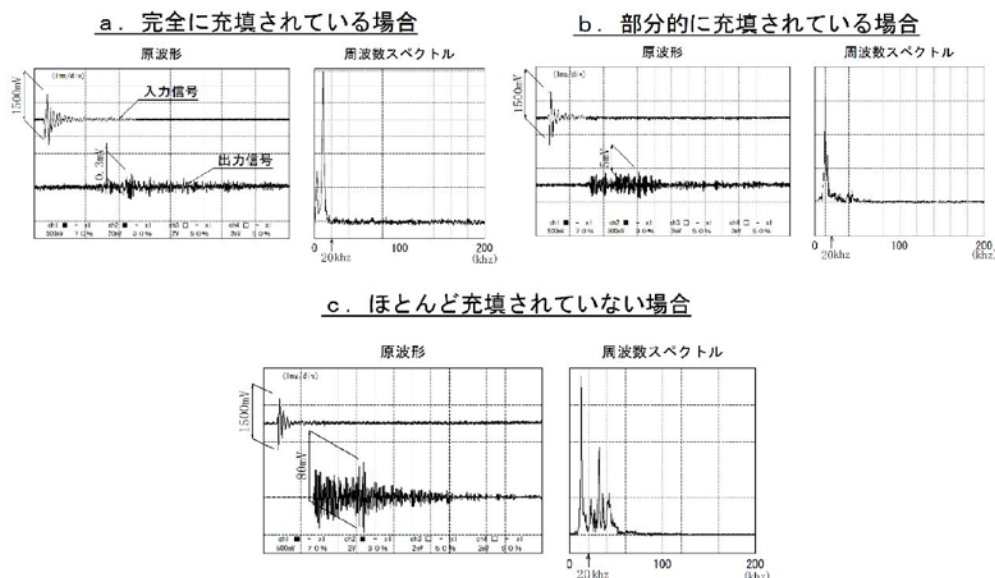



図-3.7　グラウト充填状況と受振波形の特徴との比較

また**図-3.7** では、グラウト充填状況が小さくなると、高周波成分が卓越してくる傾向が見られている。尼崎らは、研究室内の基礎実験ではあるが、長さ２ｍのφ9.2mmＰＣ鋼棒を用い、グラウト充填長さを０mm、500mm、1000mm、1500mm、2000mm と変化させた供試体実験から、**表-3.1** のような結果を得ている[3-3]。この実験の概要は、**図-3.8** に示すような、振り子で衝撃弾性波を発生させるもので、弾性波はＡＥセンサやひずみゲージを用いて検出し、グラウト充填状況や鋼材の種別が、弾性波伝播特性にどのような影響を与えるのかを検討している。

表-3.1　ＰＣ鋼棒およびグラウト長さの異なる供試体の伝播速度

供試体名	グラウト長さ (mm)	鋼棒径 (mm)	伝播速度 (m/sec)
ＰＣ鋼棒	0	9.2	5200
供試体①	500	9.2	5000
供試体②	1000	9.2	4600
供試体③	1500	9.2	4300
供試体④	2000	9.2	4100

80.0cm
AEセンサー
ひずみゲージ
鋼球
PC鋼棒

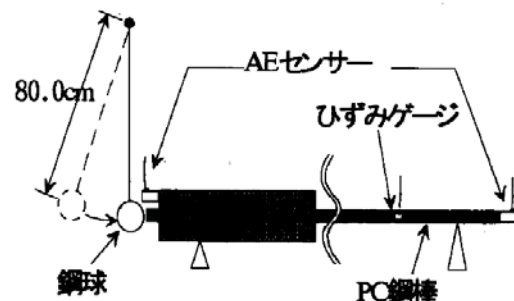



図-3.8　打撃および測定方法（グラウト側打撃）

これからも、実際の構造物においても、グラウト充填状況が高くなると、伝播してきた弾性波の卓越周波数が低くなることが検証されたといえる。

(2) 実橋におけるグラウト充填状況調査事例

弾性波伝播速度とグラウト充填状況との関係について、鎌田らが 250×2000×4000mm の形状のコンクリートスラブ供試体を用いて実験しており、ＰＣ定着部に保護コンクリートが無い場合とある場合についても検討している。実験結果によれば、グラウト充填状況が高まるにつれて伝播速度は小さくなる傾向があり、この傾向は保護コンクリートの有無にかかわらず同じであり、グラウト充填状況０％の時の速度に対して　完全充填では 60～70%となるとしている [3-4]。また、周波数に関しては、完全充填や完全未充填の場合には区別できるが、部分的な充填状況に対しては、充填の程度を評価するパラメータとしては感度が低いと報告している。

実橋での衝撃弾性波測定結果と、両耳桁に近い間詰床版で削孔して確認した結果とを整理したものが、**図-3.9** である。縦軸は受振波形の最大振幅を、横軸は削孔の結果を表している。また、**図-3.7** の成果に基づいて、●印は周波数が 20kHz 以下の場合を、▲印は 20kHz を超える周波数が僅かに認められる場合を、※印は 20kHz を超える周波数が多い場合を表している。また、コアボーリングによる調査結果とは、耳桁と１本内側の桁に挟まれた間詰部において、コアボーリングでシース内部を目視確認したもので、×印は空隙を、△印は不完全な充填を、○印は完全な充填状態をそれぞれ表している。従って『△－×』はほとんどグラウト充填されていない鋼材の状態を、『○－○』はよく充填されている鋼材の状態を表すことになる。

同図の左側ほどグラウト充填状況が不完全であることを、右側ほどグラウト充填状況が完全であることを表しているので、これからグラウト充填状況が不完全であると、受振波形の最大振幅は高く、周波数帯も高くなり、逆にグラウト充填状況が完全であれば、最大振幅、周波数帯共に低くなるといえる。

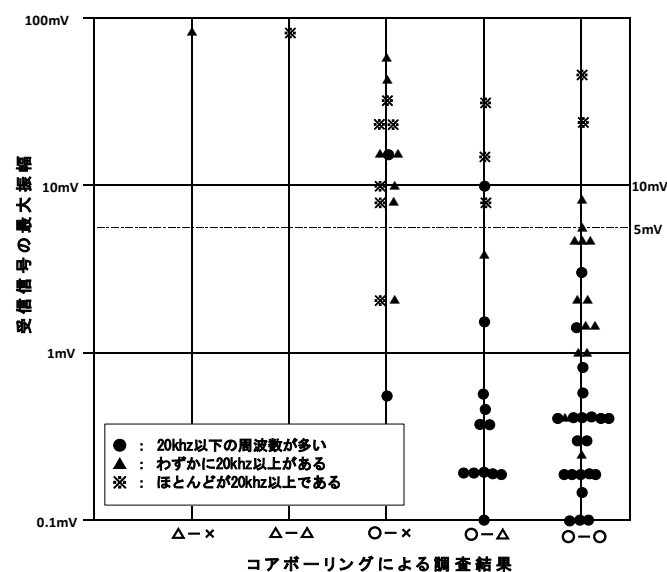



図-3.9　実橋での衝撃弾性波の特性とグラウト充填状況との関係

以上の結果をまとめると　次のようになる。

① 衝撃弾性波法は、ＰＣ横締め鋼材のグラウト充填状況を非破壊的に推定する上で次のような利点がある。

a. 鋼材全長にわたってのグラウト充填状況を推定できる。

b. 測定現場において、グラウト充填状況を推定できる。

c. 測定装置は、簡便で取扱いも容易である。

d. 測定作業を橋梁の下面側で行えるので、交通に支障を与えない。

② 今回の橋梁を対象にグラウト充填状況を診断する上での“閾値”は、受振信号の大きさと周波数の大小とで設定できる可能性が認められたが、横締めＰＣ鋼材の種別や長さが異なる場合には、その条件に適合するように定めなおす必要がある。

③ Ｘ線法を用いれば、グラウト充填状況をより正確に診断できる可能性があるものの、横締めＰＣ鋼材を橋梁床版の上下で挟み込む必要があることから、測定の作業面での改良が必要である。

このような供試体実験や実橋での調査結果を整理する形で、ＰＣ構造物管理者によってはＰＣ横締め鋼材グラウト調査マニュアル(案)等を作成して、ＰＣ横締め鋼材のグラウト充填不良部を検出し、再充填を実施してきた[3-2]。小林の研究報告によれば[3-5]、1999 年当時でもポストテンション方式のグラウト問題が取り上げられており、

① ＰＣ桁下フランジからの漏水

② ＰＣ桁下フランジの縦ひび割れ

③ Ｔ型橋脚梁のＰＣ鋼材破断

等が、ポストテンション方式のＰＣ橋のグラウト不良に起因する典型的な変状の事例と補修の例として取り上げられていた。

横締め鋼材のように調査対象数量が多く、グラウト充填が完全に行われていないと判断できる場合には、ＰＣ鋼材破断による飛び出しや後埋めコンクリートの飛散による第三者影響を防止するため、グラウト充填状況を把握する点検を実施しなければならない。**図-3.10** に示すように、ポストテンション方式のＰＣ構造物で、床版横締めでも横桁横締めであっても、横方向ＰＣ鋼材の軸方向に弾性波を伝播させることで、その伝播速度、最大振幅、周波数分布等の弾性波特性から、グラウト充填状況の評価を行うことのできる衝撃弾性波法が有効である。

(1)床版横締めのグラウト充填状況調査

(2)横桁横締めのグラウト充填状況調査

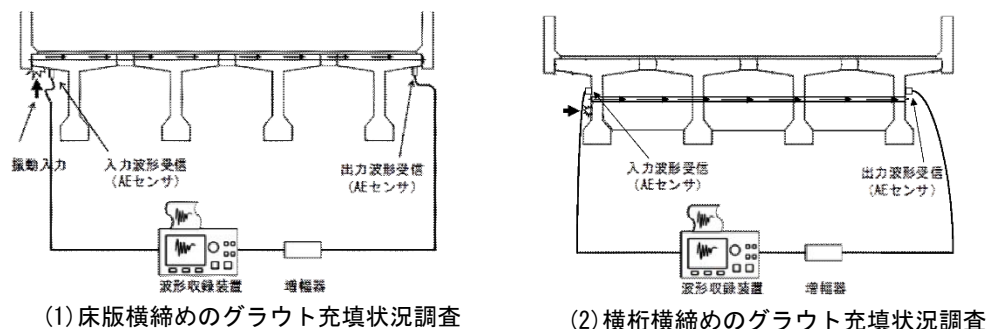



図-3.10　衝撃弾性波法の測定概要

使用機材は以下の通りである。

【使用機器】　・センサ：AE センサ　AE-901S（エヌエフ回路設計ブロック社製）
　　　　　　　・増幅器：プリアンプ　9913（エヌエフ回路設計ブロック社製）
　　　　　　　・波形収録装置：マルチレコーダー　GR-7000　(KEYENCE 製)

横締めＰＣ鋼材のグラウト充填状況調査については、高速道路を中心に鋼材破断飛び出しを防止するため、あるいは被害の抑制対策として**図-3.10** に示すような衝撃弾性波法が適宜実施されてきた。測定方法や分析方法は前節に述べた応急対応的に作成してきたマニュアルに沿って実施されたが、受振波形はその縦波の特徴をとらえやすいように**図-3.11** に示した「縦波のみ」の影響範囲に着目する方が、受振波形の周波数特性がグラウト充填に対応しているのではないかと考えられる。

横波の伝播速度は 2500m/sec と仮定する。

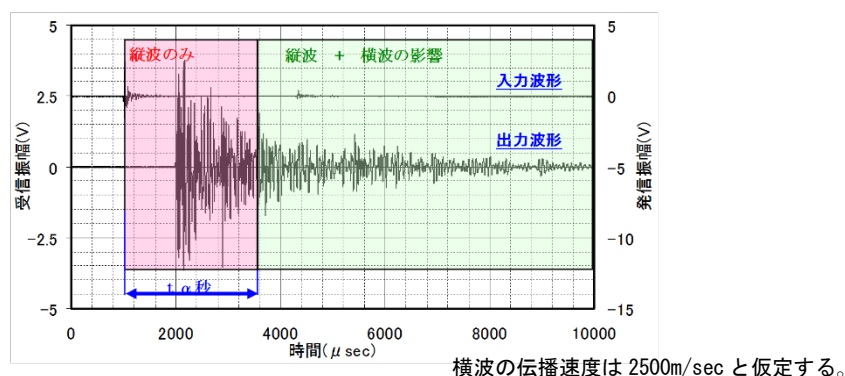



図-3.11　衝撃弾性波法　受振波形の一例

筆者らは、これまでに実橋において衝撃弾性波法で横締めＰＣ鋼材のグラウト充填状況を計測してきた約 5000 のデータを整理して、次のような結論を得ている [3-1]。

1) 衝撃弾性波法によって、横締めＰＣ鋼材の全長にわたるグラウト充填状況をある程度の精度を持って、診断できる。
2) グラウト充填状況の評価では、極端にＰＣ鋼材長さが短い場合、長さの影響を考慮した判定基準を設定する必要がある。

図-3.12 に実橋梁における床版横締めケーブルのグラウト充填状況に関して衝撃弾性波法により計測を行った結果を示す。なお、縦軸は入出力比、横軸は弾性波伝播速度である。対象はＰＣ鋼棒、ＰＣ鋼より線、ＰＣ鋼線の３種類、ＰＣ鋼材長は 2.0m～19.0m にわたる範囲での 5065 ケーブルの計測データである。弾性波伝播速度はおよそ 2800m/sec～5300m/sec、入出力比はおよそ 0.001×10^{-2}～20×10^{-2}の範囲に分布している。既往の研究 [3-4)3-6)] では、ＰＣグラウトが未充填の場合，弾性波伝播速度は

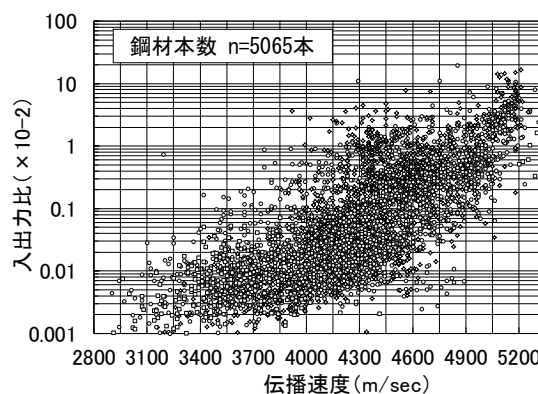



図-3.12　衝撃弾性波法　実橋計測データ

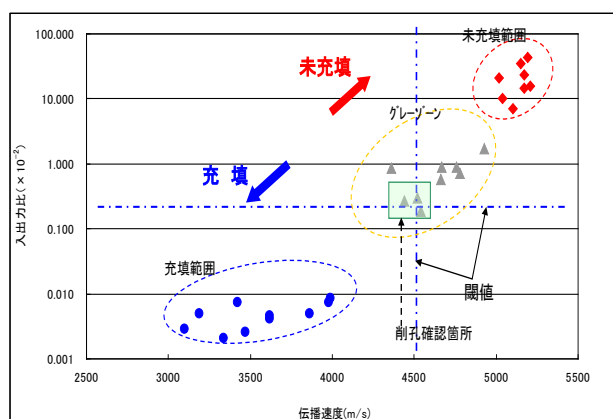
5000m/sec 以上を示し（**図−3.12** の丸の範囲）、一方、グラウトが完全に充填されている場合は4500m/sec 程度以下になることが報告されている。

全計測結果から削孔を行ったデータを**図−3.13** に示す。削孔は 383 ケーブルに対して行い、結果を図中に●：完全充填、×：充填不良、△：部分充填として表している。弾性波伝播速度が4800m/sec を超え、かつ入出力比が 0.1×10^{-2}を超えるデータにおいて充填不良（×）と部分充填（△）が急激に多くなっている。しかし、従来充填不良と完全充填の中間部分に相当するとしてきた範囲では充填不良（×）、部分充填（△）、完全充填（●）すべて混在している。

図−3.13 には 3 種類の鋼材、様々な鋼材長を含んでいるため、どの要因が弾性波伝播特性に影響を与えているのかを判断するのは困難である。

以上の検討結果より、衝撃弾性波法測定結果から横締めＰＣ鋼材のグラウト充填状況を推定するには、**図−3.14** に示すように、縦軸に入出力比、横軸に伝播速度を出した組み合わせでグラウト充填状況を判定する方法が妥当であると考えられる。

図−3.13　削孔結果と弾性波伝播速度および入出力比の関係

実橋では、上部工型式、ＰＣ鋼材の種類、ＰＣ鋼材長等の他に建設時に使用されたコンクリートと、グラウトの配合、施工条件等が異なるため、閾値の設定は厳密には径間毎に異なるとも考えられる。衝撃弾性波法による横締めＰＣ鋼材のグラウト充填状況評価はＰＣ鋼材全長にわたるグラウト充填状況を平均的に評価するものであることから、閾値に関してはある程度の幅を持たせたものとした方が実用的な判定基準になると考えられる。

図−3.14　入出力比、伝播速度とグラウト充填状況との関係

3.1.2　衝撃弾性波法のＰＣ梁橋脚への適用

橋脚の建設用地の確保が難しいような都市内高架橋においては、Ｔ型あるいは門型のＰＣ梁橋脚が建設されることがある。ＰＣ梁にはＰＣ鋼棒が用いられることが多かったが、先に述べたＰ

Ｃ上部工と同様に、シース内にグラウトを完全充填することが難しく、ＰＣ横締め鋼材と同様に、シース内に水や凍結防止剤のような有害物質が浸入して、腐食・破断を生じさせる例が増加している。ＰＣ梁橋脚の梁先端からＰＣ鋼材が飛び出すことは、第三者影響度が大きいだけでなく、構造物としての耐荷性にも問題が生じることから、グラウト充填状況を高めることは、ＰＣ横締め鋼材と同様に重要である。本論文では、床版あるいは横桁横締めのグラウト充填状況調査に採用した衝撃弾性波法を、ＰＣ梁橋脚に適用することの可否を判定する目的で供試体実験を行った [3-9]。

（1）供試体を用いた基礎実験

1）供試体形状

供試体は、長さ 18440㎜、断面寸法 640×850㎜ のコンクリート桁にＰＣ鋼棒を 200㎜ 間隔に横３列、縦４段に計 12 本配置し、ＰＣ梁橋脚端面の補強用に接着した鋼板が変形していた橋脚梁をモデル化したものである。なお、ＰＣ鋼棒φ32㎜、シースφ38㎜ とし、長さ方向（9720m＋8720m）に１箇所のカップラ繋ぎとした。**写真-3.4** には定着部の後埋めコンクリート打設前の供試体状況を示す。

－供試体全景－

－PC 鋼棒配置状況－

写真-3.4　後埋めコンクリート打設前の供試体状況

2）グラウト充填状況

グラウト充填状況は、次の３段階で行った。

・１回目のグラウト充填：

ここでの充填状況は鋼棒の長さ方向での比率で示しており、グラウトの充填状況０％（№２）、25％（№１、３、６）、50％（№４、７、９）、75％（№５、10、11）、95％（№12）および 100%（№８）の６種類とした。グラウト充填状況 25％、50％および 75％のものについては、片側充填パターン以外に両側充填および中央部充填の３パターンとした。**図-3.15** は、１回目のグラウト充填状況を表したもので、完全充填は№８、完全未充填は№２であった。

・２回目のグラウト充填：

両側充填および中央部充填のＰＣ鋼棒（№１、３、５、７、９、11）を充填状況 100％に注入し

た。**図-3.16** がその詳細を表しており、部分的な未充填が残っていたのは、No.４、No.６、No.10、No.12 であった。

<u>・３回目のグラウト充填：</u>

すべてのＰＣ鋼棒を充填状況 100%に注入した。

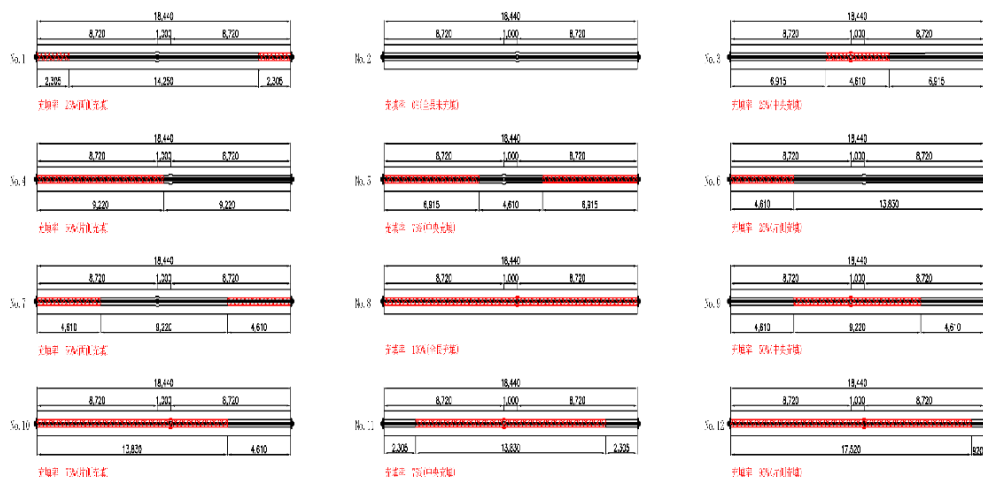



図-3.15　１回目のグラウト充填状況

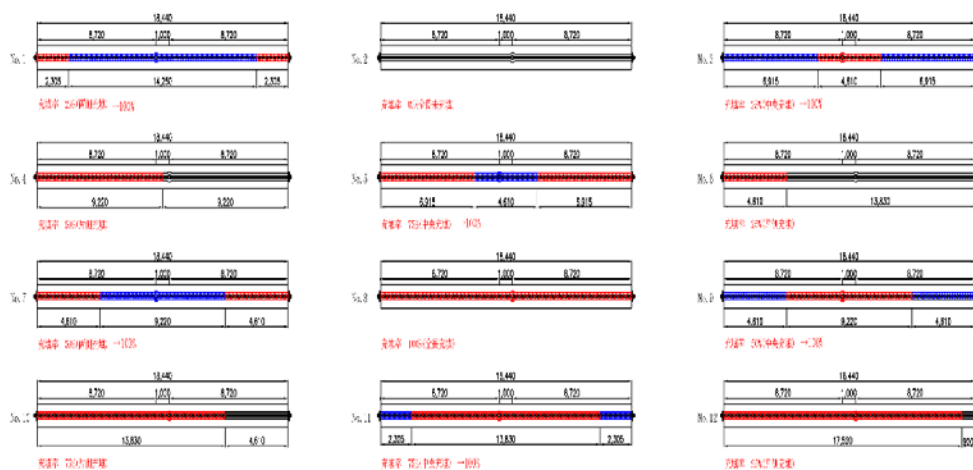



図-3.16　２回目のグラウト充填状況

3）計測方法

衝撃弾性波法による測定は、次に示すように鋼棒全長のグラウト充填状況を評価する透過法と定着部近傍の状況を評価する反射法の２つの手法を採用した。

① 鋼棒全長のグラウト充填状況（透過法）

衝撃弾性波法による測定は、一方の鋼棒端部あるいはその延長線上のコンクリートから打撃によって弾性波を入力し、もう一方の端部に設置した探触子で伝播した波形を測定してグラウトの充填状況を評価するものである。このようにすると出力波形には、**図-3.17** の測定要領に示すように、定着されている鋼棒全長にわたるグラウト充填状況の影響が反映されていることになる。

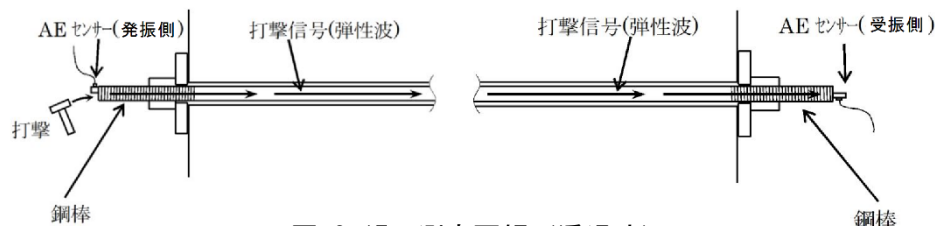



図-3.17　測定要領（透過法）

②定着部近傍のグラウト充填状況（反射法）

測定は、一方の鋼棒端部から打撃によって弾性波を入力し、グラウト充填部からの反射波を測定してグラウト充填位置までの距離を評価するものである。測定は、１本の鋼棒の両側の定着部において実施した。

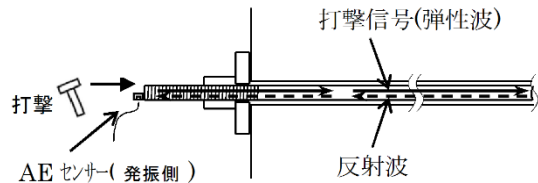



図-3.18　測定要領（反射法）

測定要領を**図-3.18** に示す。

ここで使用した機材は以下の通りである。

【使用機器】　・センサ：AE センサ　AE-901S（エヌエフ回路設計ブロック社製）
・増幅器：プリアンプ　9913（エヌエフ回路設計ブロック社製）
・波形収録装置：マルチレコーダー　GR-7000　(KEYENCE 製)

4）評価指標

計測は全ての計測ステップにおいて、１箇所に３回測定を行い、再現性を確認し収録した。透過法においては、**図-3.19** のように伝播速度および入出力比を算出した。

入出力比Ｒ＝出力振幅A_2／入力振幅A_1　-----　(3.1)

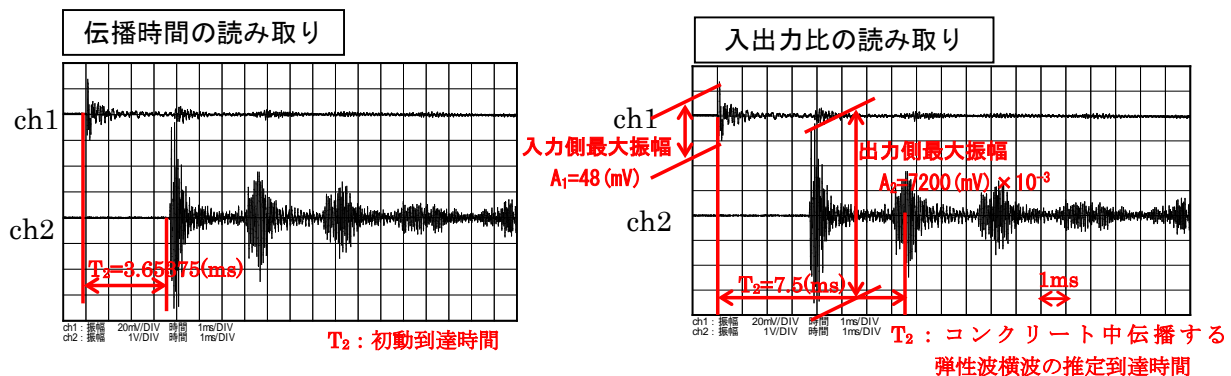



図-3.19　評価指標の算出例

5）透過法実験結果および考察

①グラウトの充填の有無および緊張力と評価指標との関係

12 本の全てのＰＣ鋼棒に関して、ＰＣ鋼棒緊張前後およびグラウトが完全充填されて硬化した後において伝播速度と入出力比がどのように変化したかを**図-3.20** に示す。図中にある鋼球棒入

力状況については**写真-3.5**に、バネポインタ入力状況については**写真-3.6**に示す。なお、計測はグラウト未充填の場合は、ＰＣ鋼棒定着部完全露出状態で、グラウト全長充填硬化後の場合はＰＣ鋼棒先端のみをはつり出した状態で測定を行った。

グラウト未充填の段階では、ＰＣ鋼棒緊張前の伝播速度は平均 5220m/s（標準偏差：9.05）であったが、ＰＣ鋼棒緊張後では平均 5120m/s（標準偏差：4.52）に低下した。

ＰＣ鋼棒を緊張することによって弾性波伝播速度が遅くなったことは、山田らの研究[3-7]に報告されているように、音弾性効果によるものと考えられる。音弾性効果は次の式で示される。

$$(VL-VL_0)/VL_0=C\cdot\sigma \quad ----- \quad (3.2)$$

ここで、VL_0は緊張前伝播速度（m/s）、VLは緊張後伝播速度（m/s）、Cは音弾性効果係数、σは緊張応力である。

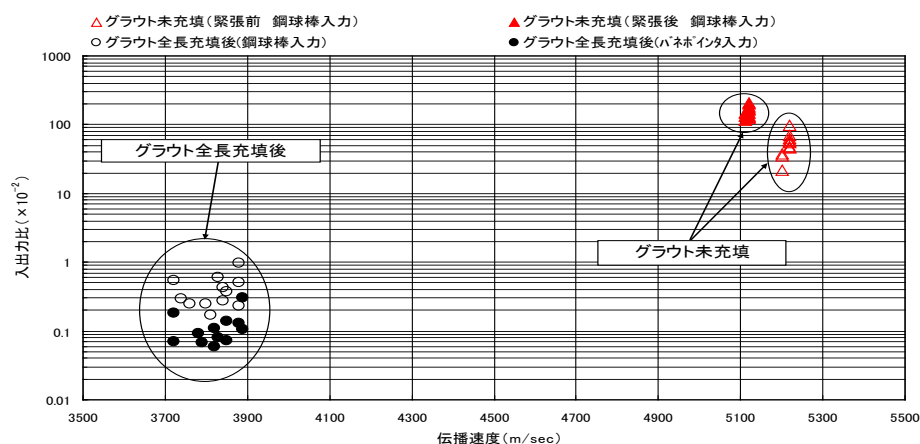



図-3.20　グラウト充填有無と評価指標との関係

写真-3.5　鋼球棒入力状況

写真-3.6　バネポインタ入力状況

本実験では、音弾性効果係数Cは、約-2.95×10^{-5}となり、山田らの研究結果-3.14×10^{-5}とほぼ一致している、

ＰＣ鋼棒緊張前の入出力比は、平均 50×10^{-2}（標準偏差：19.15×10^{-2}）であったが、ＰＣ鋼棒緊張後では入出力比が平均 150×10^{-2}（標準偏差：29.70×10^{-2}）になった。このように入出力比は

ＰＣ鋼棒緊張によって、約３倍程度大きくなっている。これは、緊張力の導入により、カップラ部において入力された弾性波が緊張前より伝播しやすくなり、鋼棒上に伝播する弾性波エネルギの損失が小さくなったためと考えられる。

グラウト未充填では、ＰＣ鋼棒緊張後の弾性波伝播速度は 5120m/s であり、これは應らの研究[3-8]に示されているように、**式（3.3）**から求められる鋼材の棒波速度と考えられる。

$$V = \sqrt{E/\rho} \quad \text{-----} \quad (3.3)$$

ここで、Ｅは弾性係数（*GPa*）、ρは密度（kg/mm^3）である。

グラウト全長充填後では、伝播速度が 3700～3900m/s となり、コンクリートの縦波速度に相当すると考えられるが、鎌田らの実験[3-4]で報告された値 4000～4400m/s よりはやや遅い。これは、今回の供試体が長さ 18.440m で、鎌田らが研究に用いた供試体（６ｍ）より約３倍長く、縦波の立ち上がり位置の、読み取りによる差ではなく、グラウトで拘束される長さが大きいことによる差であると考えられる。弾性波法では、一般にこの縦波立上り位置読取りの正確さが伝播速度の測定精度にも影響することから、受振波形の振幅感度を出来るだけ高く設定して読み取り誤差を少なくする事が望ましい。

②充填率の低いＰＣ鋼棒が近傍にある影響

図-3.21 はＰＣ鋼棒緊張後のグラウト充填状況を０％から、100％まで高めた場合のＰＣ鋼棒別の伝播速度の変化を示している。なお、計測はＰＣ鋼棒上でのバネポインタにより入力した結果である。

図-3.21　代表的な計測ステップにおける伝播速度の変化

伝播速度は、グラウト充填率の増加とともに徐々に低くなっていくことがわかる。また、充填率が低いＰＣ鋼棒に近いと、例えば当初、充填率０％のNo.２に近いNo.１、３、５のように、充填率 100％であってもＰＣ鋼棒の伝播速度が大きくなっている。当初充填率を 25％としていたＰＣ鋼棒 No. ６は、ＰＣ鋼棒 No. ２を 100％充填した後でも伝播速度の変化が見られない。また、グラウト充填率 50％のＰＣ鋼棒 No. ４では、ＰＣ鋼棒 No. ２硬化後に伝播速度が 200m/s 小さくなったが、グラウト充填率 25％のＰＣ鋼棒 No. ６を 100％充填後では、伝播速度の変化が見られない。これらのことから、50％以上未充填の鋼棒では、周辺の鋼棒の充填率の影響を受けにく

いと考えられる。充填率 75%、95%のＰＣ鋼棒 No. 10、No. 12 でも、離れた位置にある№２、６の充填された影響を受けて伝播速度が低下する。

図-3. 22 にはＰＣ鋼棒緊張後、部分的なグラウト充填からすべてのＰＣ鋼棒にグラウトが注入後硬化するまでの入出力比の変化のある段階を示している。なお、計測はＰＣ鋼棒上でバネポインタ入出力した結果とした。

図から入出力比は、全ての鋼棒で充填率０%の場合 100×10^{-2}となり、№１、№３、№６鋼棒で充填率 25%の場合 1×10^{-2}程度となり、約 1/100 と小さくなっている。このことから、入出力比はグラウト充填の有無に感度の良い評価指標であると考えられる。ただし、充填率０%のＰＣ鋼棒 No. ２の充填前後を比較すると、ＰＣ鋼棒 No. ２に接する No. １、No. ３の入出力比が 1/10 程度となって、隣接する鋼材のグラウト充填状況に影響されていることが分かる。

また、充填率の増加に伴い、入出力比が小さくなっていく傾向にあるが、ＰＣ鋼棒配置に起因すると見られるばらつきがあることから、グラウト 50%以上充填していれば入出力比による評価は困難になると考えられる。

図-3. 22　代表的な計測ステップにおける入出力比の変化

以上のことから、グラウト充填率は伝播速度および入出力比との相関が高いと考えられるが、本実験のようにＰＣ鋼棒の配置が 200 ㎜間隔と密になっている場合では、充填率の低いＰＣ鋼棒が周囲の鋼棒の入出力比を少し大きくするような影響を与え、その近傍のＰＣ鋼棒の充填状況を実際よりも少なく評価する傾向が認められる。

全般的に、グラウト充填率が高くなると隣の鋼棒に与える影響も低くなると考えられる。今後は供試体で得られた伝播速度や入出力比のような評価指標を用いて、透過法の適用によりグラウト充填不良のＰＣ鋼棒を割り出し、次の 6)節に示す反射法による詳細調査が必要であると考えられる。

6) 反射法実験結果および考察

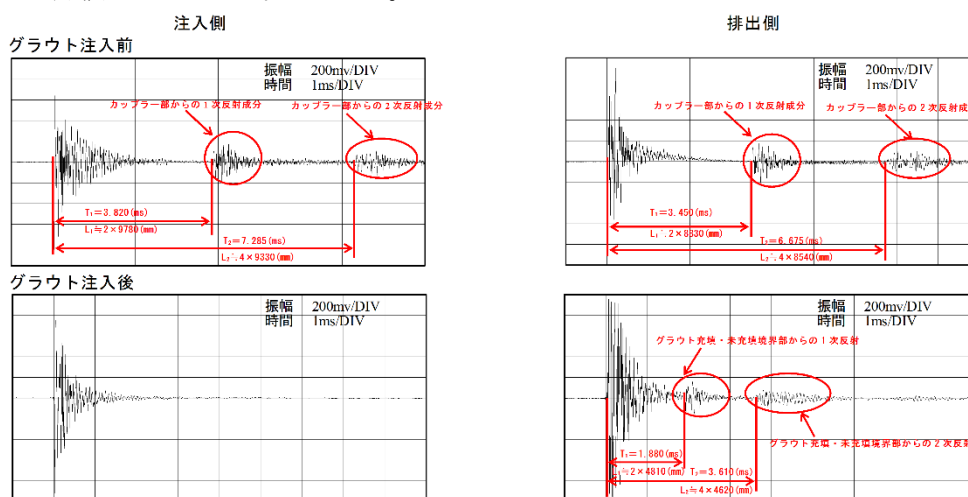
透過法によるグラウト充填結果から、グラウト充填率が極端に低いＰＣ鋼棒が存在すれば、その近傍のＰＣ鋼棒のグラウト充填率は、実際よりも小さく評価される可能性があることが分かっ

た。そこで、透過法だけでなく鋼棒定着部から入力した際のグラウト充填・未充填の境界あるいはカップラ部からの反射波の有無を測定することによって、グラウト充填状況を両側の定着部から評価する方法を検討した。

① 後埋めコンクリート打設前での計測

ＰＣ鋼棒 No.10 のＰＣ鋼棒緊張後（グラウト充填前）とグラウトを充填して硬化した後の反射法計測結果を**図-3.23、3.24** に示す。

グラウト充填前において、カップラからの反射波と見られる成分が２回観測されている。グラウト充填後、端部までグラウトが充填されている側では、波形にカップラによる反射成分がみられない。一方、排出側のように 4.61mのグラウト未充填部がある定着部では、グラウト充填・未充填の境界から反射波と考えられる成分が見られる。また、ＰＣ鋼材の縦波速度を用いて弾性波入力位置から反射源までの距離を算出すると、誤差が数十 cm と小さく、グラウト充填位置を推定することが可能と考えられる。

しかし、№11 のようにグラウト充填後のＰＣ鋼棒露出長さ（グラウトの未充填長さ）が２m程度と短くなると、計算上の１次反射成分が入力側の弾性波が減衰しきる前に到達する。このため、反射波が入力波形と一体になり、分別困難となる可能性がある。ただし、この場合においては、反射波は１回しか観測できなかった。このことから、端部から反射源の距離２m程度以下の場合は、観測された反射波の回数が１回であれば、反射成分は２次成分またはそれ以上の次数成分である可能性がある。この場合はグラウト未充填の長さを正確に評価するのは困難であるが、仮に２次反射を１次反射と誤認しても、未充填長さを長く評価することになるので、評価は安全側にあり、大まかな評価ができると考えられる。

注：図中、T_iは伝播時間、L_iは推定伝播距離を示す。なお、伝播速度は鋼材の棒波速度 5120m/s（実測値）を用いた。

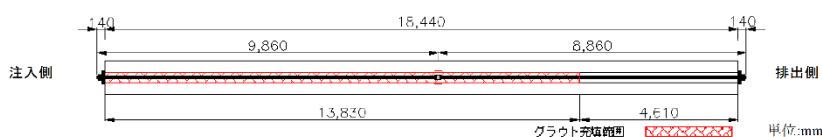
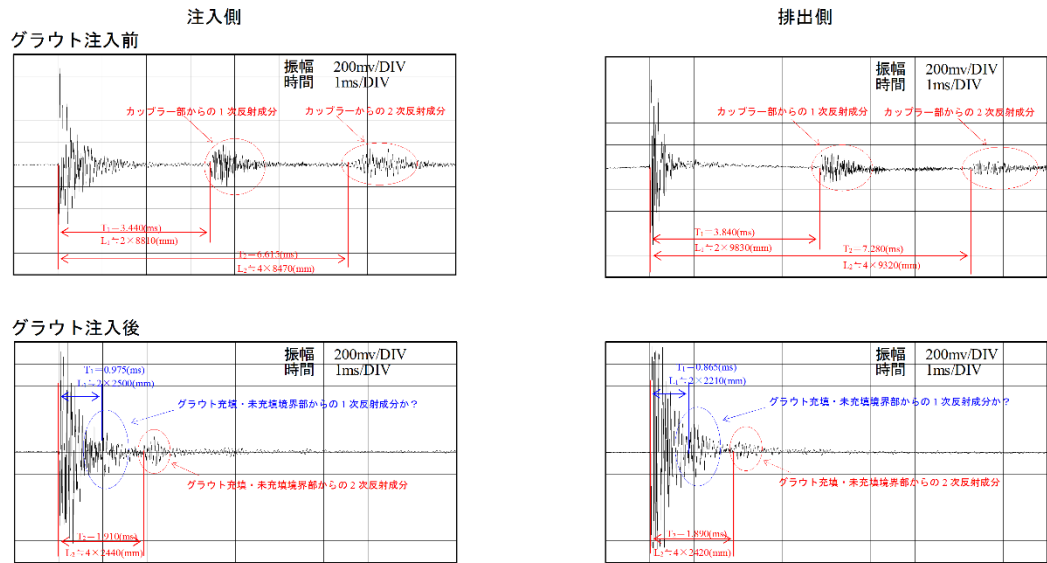



図-3.23　反射波測定結果例（PC 鋼棒　No.10）

注：図中、T_iは伝播時間、L_iは推定伝播距離を示す。なお、伝播速度は鋼材の棒波速度 5120m/ｓ（実測値）を用いた。

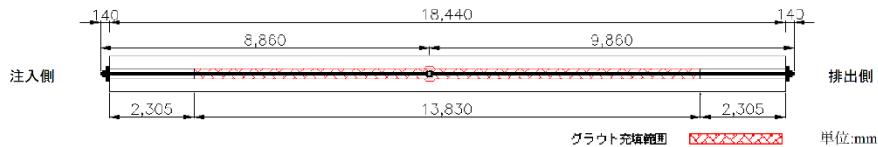



図-3.24　反射波測定結果例（PC 鋼棒　No.11）

7）供試体実験のまとめ

実験結果から、打音振動法によるＰＣグラウト充填評価について以下のことが判明した。

① 一方の定着部より入力し、他方で受振する透過法では、ＰＣ鋼棒の弾性波伝播速度と入出力比とは、グラウト充填状況と良い相関関係があり、グラウト充填状況を非破壊的に評価できる。

② 本論文で対象としたようなＰＣ鋼棒が接近して配置されている構造物では、測定した鋼棒に隣接した鋼棒のグラウト充填状況が影響することがある。

③隣接する鋼棒のグラウト充填率が極端に低い場合には、測定対象鋼棒のグラウト充填状況を実際よりも低く評価する傾向がある。

④１ヶ所の定着部で入力し、その反射波を測定する場合には、グラウト未充填部が定着部から４ｍ以上あれば未充填長さを推定することが可能である。

以上のことから、衝撃弾性波法を用いればカップラで接続されたＰＣ鋼棒であっても、既設構造物のグラウト充填状況を次のような手順で評価できるといえる。

① 定着部の後埋めコンクリートが健全である場合には除去しないままで、透過法を適用し、その全長にわたるグラウト充填状況を評価する。

② 透過法でグラウト充填状況が低いと判定された場合には、定着部の後埋めコンクリートを除去して反射法の判定を用い、未充填長さを推定する。

（2）実橋におけるグラウト充填状況調査事例

既設ＰＣ梁橋脚 13 基のグラウト充填状況を調査するために、衝撃弾性波法の測定を行った。使用機材は以下の通りである。

【使用機器】　・センサ：AE センサ　AE-901S（エヌエフ回路設計ブロック社製）
・増幅器：プリアンプ　9913（エヌエフ回路設計ブロック社製）
・波形収録装置：メモリハイコーダ　851（日置電機㈱製）

なお、当初の評価指標は、既往の測定結果や供試体実験等を総合的に考慮し、グラウト充填不良の可能性が高いと考えられる「入出力比 1×10^{-2}以上、または伝播速度 5000m/sec 以上」をグラウト充填不良の基準として評価した。

ここで調査対象としたＰＣ梁橋脚は、いずれもＴ型単柱式で、梁長さは 19～20ｍで、ＰＣ鋼棒の配置が密（200㎜程度間隔）であり、グラウト充填良好のＰＣ鋼棒であっても近隣する充填不良のＰＣ鋼棒から弾性波の迂回等による影響を受ける可能性があった。そのため、ＰＣ鋼棒のグラウト充填状況の評価精度を高めるには、次節の反射法測定を行うだけでなく、削孔可能なＰＣ鋼棒については削孔調査を行った。

衝撃弾性波法による評価結果の概要を**表-3.2** に示す。調査を行った 13 橋脚の内、８橋脚にグラウト不良と評価された鋼棒があり、その数量は全 576 本の約 8%に相当する 42 本であった。

衝撃弾性波法の測定は、13 橋脚計 576 本のＰＣ鋼棒を対象に行った。測定波形例を**図-3.25** に示したが、入力された振動が出力側へ伝わる時には、評価に有効な縦波成分の他に、横波やコンクリート表面を伝達する表面波の影響も受けている。そのため、過去の調査等から横波や表面波等の伝播速度は 2500m/sec 程度であることから、それらが到達する以前の振動に着目し、入出力比の分析を行った。**図-3.25** に測定波形からの振幅値の読み取り例を示す。測定を行ったＰＣ梁橋脚の測定間距離が L=18.8m の場合、片側の定着部で入力された振動が伝播速度 V=2500m/sec であれば、もう片側の定着部に到達する時間Ｔは**式（3.4）**より 7.52msec と算出される。入力直後から、この時間内の出力側の最大振幅値から入出力比を算出して評価を行った。

表-3.2　衝撃弾性波法による評価結果概要

橋脚番号	竣工年度	工事工区	ＰＣ鋼棒数量（φ32）		調査数量	グラウト充填状況推定結果注)	
			端部定着	下面定着		充填	不良
0T179	昭和 53 年	T.K.	44 本	無	44 本	39 本	5 本
0T 180	〃	〃	45 本	9 本	45 本	32 本	13 本
0T 181	〃	〃	45 本	9 本	45 本	40 本	5 本
0T 182	〃	〃	44 本	無	44 本	40 本	4 本
0T 183	〃	〃	44 本	無	44 本	33 本	11 本
0T 184	〃	〃	45 本	9 本	45 本	45 本	0 本
0T 185	〃	〃	45 本	9 本	45 本	44 本	1 本
0T 186	〃	〃	44 本	無	44 本	44 本	0 本
0T 187	〃	〃	44 本	無	44 本	43 本	1 本
0T 188	〃	〃	44 本	無	44 本	42 本	2 本
0T 189	〃	〃	44 本	無	44 本	44 本	0 本
0T 190	〃	〃	44 本	無	44 本	44 本	0 本
0T 191	〃	〃	44 本	無	44 本	44 本	0 本
合　計			576 本	36 本	576 本	534 本	42 本

$$T = L / V \quad ----- \quad (3.4)$$

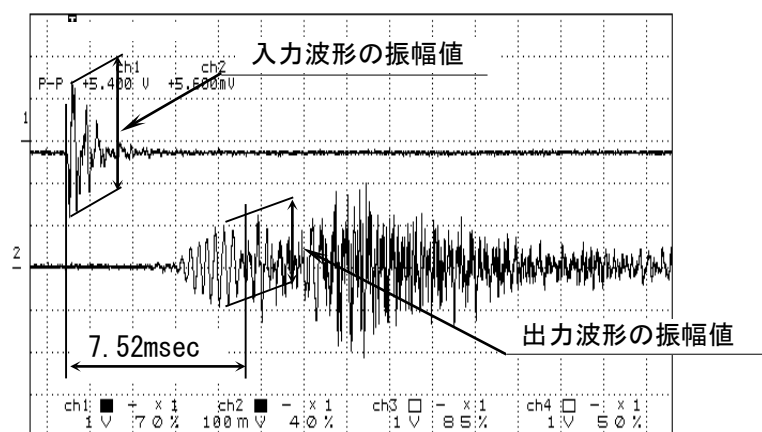



図-3.25　　測定波形からの振幅値の読み取り例

なお、測定は３回行っており、その内入出力比が最大のデータを代表値としている。見かけ上の伝播速度は、入力された振動が受振側へ伝わるまでの伝達時間を読み取り、それぞれの測定間距離を伝達時間で除して求めた。伝播時間の読み取りは、入出力比の代表値のデータを対象に行った。周波数分析は、入出力比や伝播速度での評価を行うための参考として、出力波形の周波数特性を確認するために行った。

橋脚における入出力比と伝播速度との関係、および梁端面ＰＣ鋼棒の配置位置の代表例を OT180 橋脚として**図-3.26** に示す。

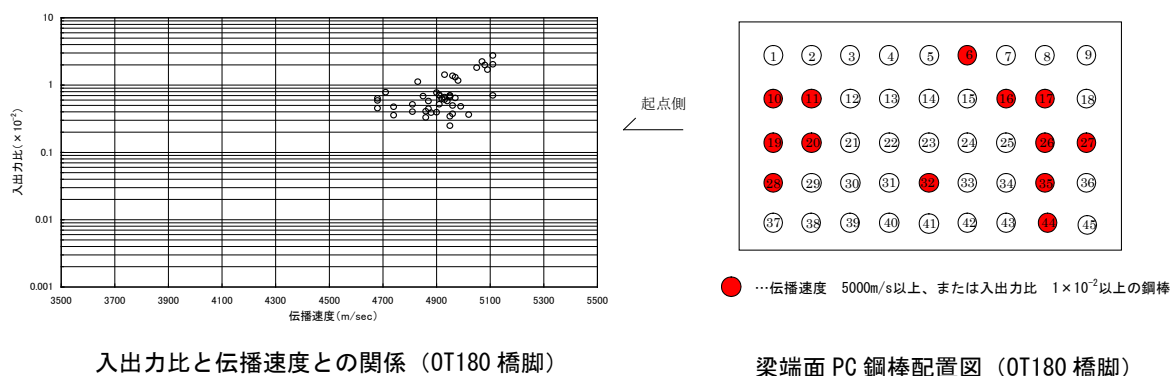



図-3.26　　OT180 橋脚 PC 鋼棒番号位置およびグラウト充填評価結果

分析の結果、入出力比や伝播速度の分布が各橋脚でバラツキが大きくなっている。OT186、OT189、OT190 および OT191 橋脚については、入出力比 0.1×10^{-2}程度以下、かつ伝播速度 4500m/sec 程度以下の小さい範囲に分布しており、これらの橋脚についてはグラウトの充填状況が高いものと思われる。

OT179、OT180、OT181 および OT183 橋脚については、入出力比 0.1×10^{-2}程度以上、または伝播速度 4500m/sec 程度以上と全体的に大きい値になっている。OT182、OT184、OT185、OT187 および OT188 橋脚については、入出力比約 0.01～3×10^{-2}程度、伝播速度約 4000～5100m/sec と幅の広い

範囲に分布している。これらは、グラウト充填不良のＰＣ鋼棒が存在し、グラウト充填不良のＰＣ鋼棒およびその近傍に配置するＰＣ鋼棒が弾性波の迂回等による影響を受け、大きな値を示し、グラウト充填不良のＰＣ鋼棒より比較的遠くに配置されたＰＣ鋼棒が小さい値を示すためと考えた。

1）反射法測定結果

衝撃弾性波法の測定から、グラウト充填不良の可能性が高いとされるＰＣ鋼棒（42 本）を抽出し、さらに削孔調査が困難なＰＣ鋼棒（23 本）に対して反射法測定を行った。

また、衝撃弾性波法の評価でグラウト充填とされたＰＣ鋼棒（534 本）の内、評価指標値の近傍に分布している一部（26 本）のＰＣ鋼棒を選定し反射法測定を行った。

反射法は、梁端部のＰＣ鋼棒上で測定を行った。測定側のＰＣ鋼棒の端部までグラウトの充填が不良であれば、入力された弾性波がＰＣ鋼棒上に伝播し、カップラ部、またはグラウトの充填/未充填の境界部から反射波成分が生成し、入力側に戻ってくる。これに対して、グラウトが充填されていれば、ＰＣ鋼棒上に伝播する弾性波がグラウトを介してコンクリート中への拡散により減衰し、測定側に反射波が観測されない。

評価は、次に示すように測定側の反射波の有無によって行った。

両側の測定結果とも反射波が見られない場合・・・「充填良好」
片側の測定結果に反射波が見られた場合　　・・・「片側充填不良」
両側の測定結果とも反射波が見られた場合　・・・「全長充填不良」

図-3.27 は反射法の測定例を示したもので、測定波形から反射位置を推定するものである。

同図からわかるように入力された弾性波がいったん減衰し、ある時間後にまた立ち上がってそして減衰し、ほぼ同じ時間後に再び立ち上がることが見られる。これは、ＰＣ鋼棒の端部とＰＣ鋼棒の長さ方向にある反射境界との間に繰り返し波が生じているものと考えられる。

衝撃弾性波法測定結果（入出力比と伝播速度との関係）　　梁端面 PC 鋼棒配置図

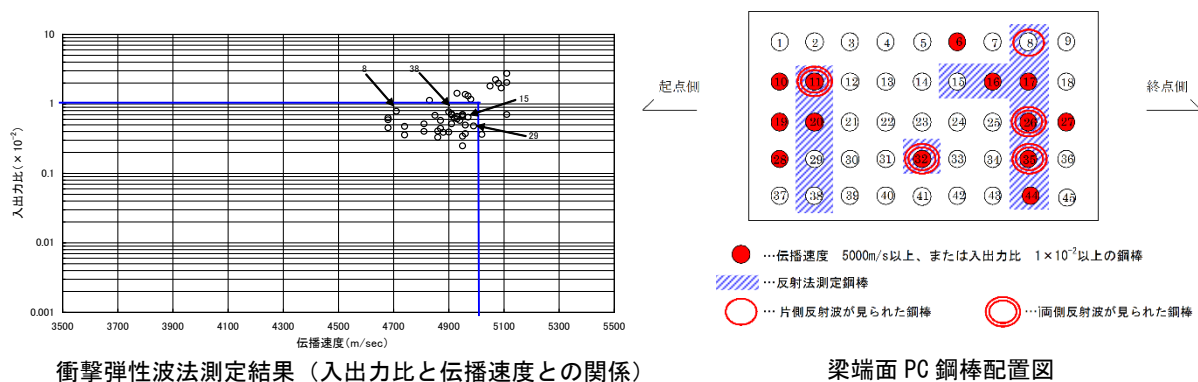



図-3.28　反射法測定箇所および測定結果（180 橋脚）

反射法による評価結果の概要を**表-3.3** に示し、代表例 0T180 での調査箇所位置および測定結果を**図-3.28** に示す。調査を行った８橋脚、合計 49 本の内、グラウト充填不良と評価したのは、５橋脚でグラウト両側未充填が 14 本、片側充填が２本である。

表-3.3　反射法評価結果概要

橋脚番号	竣工年度	工事工区	調査数量	反射法評価結果		
				充填良好	片側充填不良	全長充填不良
0T179	昭和 53 年	T.K.	5 本	1 本	1 本	3 本
0T180	〃	〃	12 本	7 本	1 本	4 本
0T181	〃	〃	6 本	2 本	0 本	4 本
0T182	〃	〃	4 本	4 本	0 本	0 本
0T183	〃	〃	11 本	9 本	0 本	2 本
0T185	〃	〃	5 本	4 本	0 本	1 本
0T187	〃	〃	2 本	2 本	0 本	0 本
0T188	〃	〃	4 本	4 本	0 本	0 本
合　計			49 本	33 本	2 本	14 本

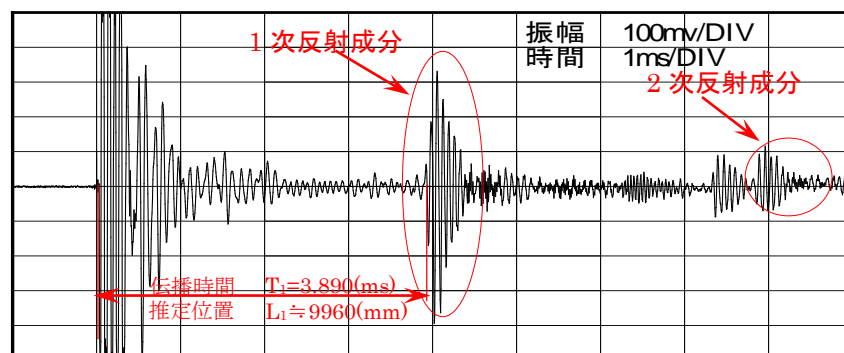



図-3.27　反射法測定結果例

グラウト充填不良区間の推定は、反射波の到達時間Ｔ、弾性波の鋼棒上の伝播速度 V（棒波速度実測 5120m/sec）を用いて、**式（3.5）** より反射波の往復伝播距離を求めた。

$$L = (V / T)/2 \qquad \text{-----} \qquad (3.5)$$

測定の結果から、５橋脚で計 14 本のＰＣ鋼棒は両側の測定において反射波が見られた。片側での測定結果から推定されるグラウトの充填不良区間は、それぞれ端部より 10ｍと８ｍ前後の長さとなり、設計上のカップラの位置とほぼ一致する。これらのＰＣ鋼棒は全長に亘りグラウト充填不良であると考えられる。また、片側のみ反射波が見られた２本のＰＣ鋼棒においても、推定されるグラウトの充填不良区間は 10ｍと８ｍ前後の長さとなり、カップラの位置からの反射波と考えられる。

評価結果は、前出の**表-3.3** のようになり、14 本のＰＣ鋼棒が全長充填不良、２本のＰＣ鋼棒が

片側充填不良と評価した。

2）削孔・通気調査結果

削孔によるグラウト充填状況の確認は、衝撃弾性波法によるグラウト充填状況調査でグラウト充填不良の可能性が高いと評価されたＰＣ鋼棒のうち、梁断面の最も外側に配置されているＰＣ鋼棒および反射法によりグラウト充填不良と評価されたＰＣ鋼棒を対象に実施した。なお、かぶりが大きく削孔が困難である下面側に配置されているＰＣ鋼棒は対象外とした。

調査結果の概要を**表-3.4** に示す。調査を行った７基の橋脚　合計 22 本の内、ＰＣ鋼棒全長に亘りグラウト充填不良が 14 本、部分充填不良が３本、グラウト充填良好が５本であった。

表-3.4　削孔調査評価結果一覧

橋脚番号	竣工年度	工事工区	調査数量	削孔調査結果		
				充填良好	部分充填不良	全長充填不良
OT179	昭和 53 年	T.K.	3 本	0 本	1 本	2 本
OT180	〃	〃	6 本	2 本	1 本	3 本
OT181	〃	〃	1 本	0 本	0 本	1 本
OT182	〃	〃	4 本	1 本	1 本	2 本
OT183	〃	〃	4 本	1 本	0 本	3 本
OT187	〃	〃	1 本	0 本	0 本	1 本
OT188	〃	〃	3 本	1 本	0 本	2 本
合　計			22 本	5 本	3 本	14 本

注）OT188 で調査を行った３本の内、グラウト充填良好の１本は、打音振動法および反射法測定でグラウト充填良好と評価したもので非破壊評価の有効性を確認するために行ったものである。

3）ＰＣ梁橋脚での衝撃弾性波法によるグラウト充填状況評価手法

今後の適用には今回の調査結果を生かし、衝撃弾性波法の評価指標の設定や反射法測定箇所の選定を検討し、より評価の精度および調査の効率化を高められると考えられる。本調査対象とした 13 橋脚、576 本のＰＣ鋼棒のグラウト充填状況調査を**図-3.29** に示す。

図-3.29 では、衝撃弾性波法測定結果と反射法および削孔調査結果を合わせて示している。なお、図中のマークは次に示すものとした。

「×」：削孔調査によりほぼ全長に亘りグラウト充填不良と評価したもの

「▲」：削孔調査によりグラウト部分充填不良と評価したもの

「□」：削孔調査結果によりグラウト充填良好と評価したもの

「＊」：反射法測定によりほぼ全長に亘りグラウト充填不良と評価したもの

「＋」：反射波によりグラウト部分充填不良と評価したもの

「◇」：反射法測定によりグラウト充填良好と評価したもの

「○」：衝撃弾性波法のみの実施結果によりグラウト充填良好と評価したもの

図-3.29　衝撃弾性波法測定結果と反射法測定および削孔調査結果との関係

同図から、入出力比が 0.001～5×10^{-2}、伝播速度が 3500～5120m/sec と広い範囲に分布しており、入出力比、伝播速度とグラウト充填状況との間に相関があることがわかる。

また、削孔調査結果でグラウト充填不良「×」、および反射法測定結果でグラウト充填不良「＊」と評価したＰＣ鋼棒は、入出力比のバラツキがやや大きいが、伝播速度が他のものよりも大きな値を示す傾向にあり、そのほとんどは「伝播速度が 5050m/sec 以上」の領域にある。この領域はＰＣ鋼棒全長に亘りグラウトが充填されていないものと考えられる。この領域よりやや小さい領域に分布しているＰＣ鋼棒は、グラウト充填良好と不良が混在し、衝撃弾性波法のみでは評価が不確定になると考えられる。

グラウト部分充填不良の「▲」に着目すると、２本のＰＣ鋼棒はそれぞれ入出力比が 0.781×10^{-2}、0.500×10^{-2}となり、伝播速度が 4780m/sec、4980m/sec となり、評価指標のどちらかが大きな値を示している。グラウト充填良好のＰＣ鋼棒は、入出力比と伝播速度がこの２本のＰＣ鋼棒より下側の小さい領域に分布すると考えられる。この２本のＰＣ鋼棒の下側領域に、反射法より充填良好と評価されているＰＣ鋼棒は、入出力が 0.593×10^{-2}、伝播速度が 4880m/sec があり、評価指標を安全側に丸め、「入出力が 0.5×10^{-2}以下かつ伝播速度が 4850m/sec 以下」であればグラウト充填が良好と考えられる。

以上をまとめると、衝撃弾性波法によるＰＣ梁橋脚でのグラウト充填状況評価指標は次のように設定すれば有効に利用できると考えられる。

入出力比 0.5×10^{-2}以下　かつ　伝播速度 4850m/sec 以下であれば、グラウト充填状況良好
入出力比 0.5×10^{-2}以上　または　伝播速度 4850m/sec 以上であれば、グラウト充填状況不確定
伝播速度 5050m/sec 以上であれば、グラウト充填状況不良

(3) ＰＣ梁橋脚のグラウト施工管理

ポストテンション方式のＰＣ構造物を建設する場合、グラウト充填状況の検査を併用してグラウト充填の確実性を高めることができる。

現在ＰＣ梁橋脚の建設においては、ＰＣ鋼材としてＰＣ鋼より線が使用される。これは、ＰＣ鋼棒を使用した場合に比較してＰＣ鋼材とシースとの空隙が大きくなるだけでなく、さらに長尺であってもカップラを使用する必要がないことから、グラウト充填の観点からは施工性が向上することが期待されているためである。

本論文では都市内高速道路で平成22年５月に建設された門型ＰＣ 梁橋脚を対象に衝撃弾性波法を取り上げて、グラウト施工管理をする場合の現場適用性を、実橋の建設工事に合わせて検討した[3-10]。

1) 現場測定

測定手法は、測定対象とする鋼材の片側の定着部から弾性波を入力して、シース内のＰＣ鋼材を伝達させ、もう一方の定着部にＡＥセンサを取付けて得られた波形を観察して、グラウトの充填状況を推定する透過法を用いた。

測定対象としたＰＣ梁橋脚は**図-3.30**に示すように、梁部にプレストレスを導入するＰＣ鋼より線はSEEE-F200タイプ、長さは28.0mであった。鋼材長が過去の実績21.0mに比べて長いことから、弾性波の入力方法や収録した波形のノイズを可能な限り小さくできるような波形収録装置を検討すること等が必要であった。

使用した測定機材は、下記の通りである。

【使用機器】
- センサ：ＡＥセンサ　AE-901S（エヌエフ回路設計ブロック社製）
- 増幅器：プリアンプ　9913（エヌエフ回路設計ブロック社製）
- 波形収録装置：マルチレコーダー　GR-7000（KEYENCE製）

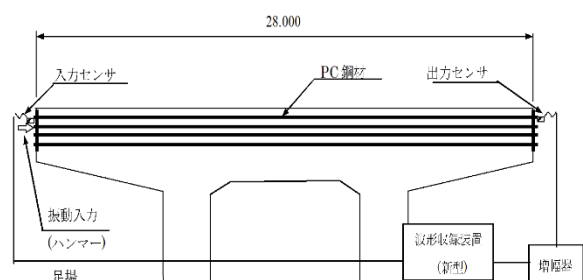



図-3.30　衝撃弾性波法測定要領

2) 入力方法

弾性波の入力方法については、通常使用しているバネポインタとハンマによる打撃とを比較検討した。その一例を**図-3.31**、**図-3.32**に示すが、各図の上段が、入力波形を示しており、下段が受振波形である。ハンマの場合、入力信号の大きさは受振振幅が過大になりすぎないように加減した。

受振波形の振幅値は図中左側の軸に示しており、波形のレンジは、グラウト硬化後は充填前の10倍の感度となっている。

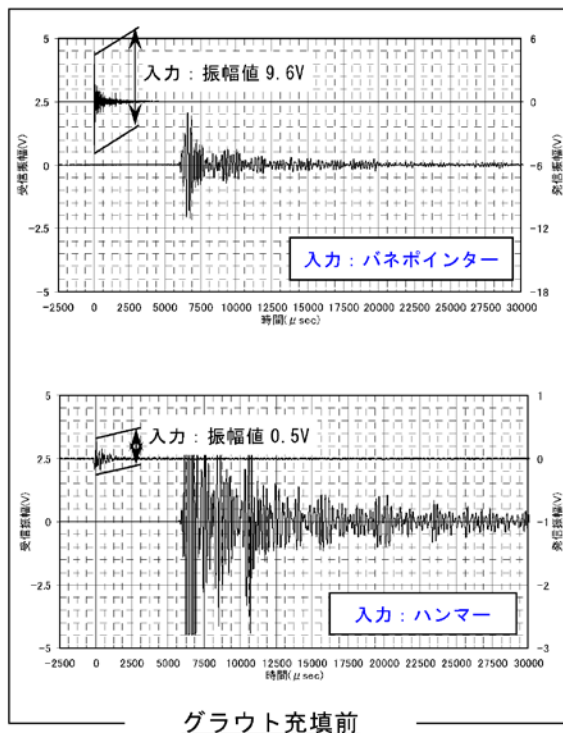



図-3.31　入力方法による受振波形の相違
（グラウト充填前）

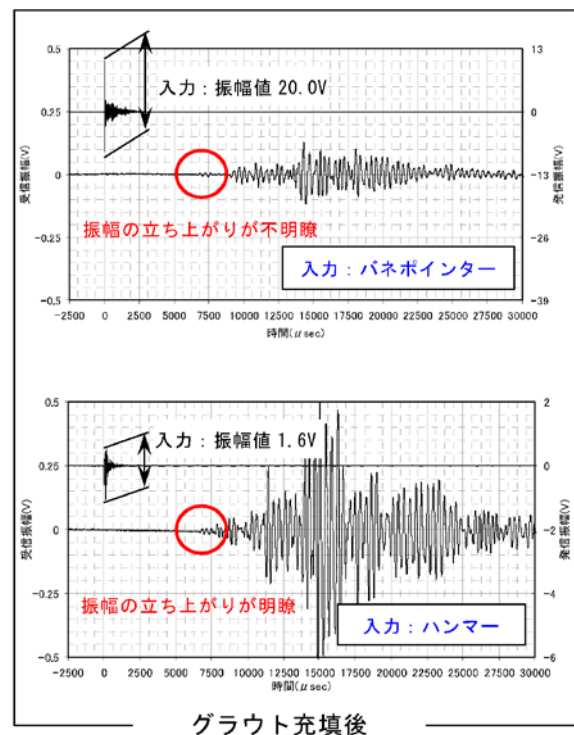



図-3.32　入力方法による受振波形の相違
（グラウト硬化後）

グラウト充填前のバネポインタの入力値は9.6V、ハンマでの入力値は0.5Vであるのに対し、受振した振幅値は、ハンマの方が2倍以上大きい。またグラウト硬化後においても、バネポインタでの入力値が20.0V、ハンマでの入力値が1.6Vであったにも関わらず、ハンマでの打撃入力の方が受振波の振幅値は大きかった。

一般に、バネポインタによる弾性波の入力では、高周波成分の入力に、逆にハンマでの入力は低周波成分の入力に適しているといわれている。高周波成分を多く含む波は、伝播距離が長くなるとエネルギを減衰しやすいことから、今回のように伝播距離が長い場合では、ハンマでの入力方式の方が有利であると考えられた。このことは、受振波形の初動波の立ち上がりについても、ハンマでの入力方式の方がより明瞭であったことから裏付けられる。

3）波形収録装置の選定

グラウト硬化後の受振波形を波形収録装置の違いに着目して比較した結果を**図-3.33**に示す。波形収録装置以外は、全て同じシステムとしている。探触子の性能を同一と規定しても、電子機器の性能は日進月歩であり、弾性波法の測定でも性能のよい機器、とくに波形収録装置のS/N比（信号雑音比　signal-noise ratio）によって、出力感度が異なることがある。

受振波の縦軸のレンジは両者とも同じとしているが、従来型装置の波形に比べて新機種の波形の方がノイズの幅が小さく、初動波の立ち上がりが明瞭になっている。新機種の方が伝播時間や受振振幅値の読み取り精度を向上させることが可能になると期待されたため、本論文では、汎用機種の中でもよりS/N比の大きい（ノイズに比べて信号が大きい）新機種を採用することとした。

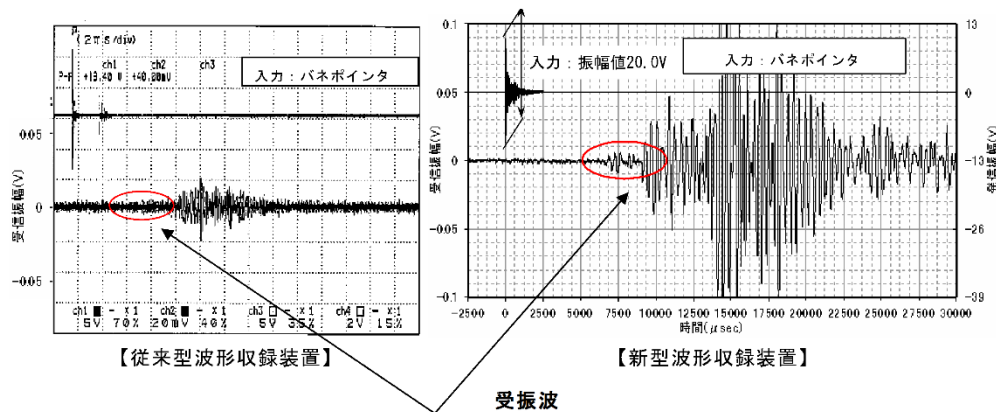



図-3.33　波形収録装置の違いによる受振波（グラウト硬化後）

4）測定結果

衝撃弾性波法による測定は、配置されている鋼材20本全てを対象に行った。ＰＣ 鋼材配置および測点位置図を**図-3.34**に示す。

測定はＰＣ鋼材緊張後のグラウト充填前とグラウト硬化後とに行ったが、衝撃弾性波法の測定は３回行っており、そのうち入出力比が最大のデータを代表値とした。

入出力比とは出力振幅／入力振幅で表わせられるもので、衝撃弾性波法では、グラウト充填状況を評価する指標の１つとして使用される[3-7]。入力された振動が受振側へ伝わるまでの伝播時間と、ＰＣ鋼材長さから見かけ上の伝播速度を求めた。

図-3.34　PC 鋼材 測点位置図（右側梁部）

図-3.35　入出力比と伝播速度との関係
(SEEE-F200　L=29.4m)

グラウト充填前後での入出力比と伝播速度との変化を**図-3.35**に示した。測定結果から、入出力比はグラウト充填前が3.231～16.041×10^{-2}、グラウト硬化後が0.104～0.622×10^{-2}となっており、グラウト充填前後では30倍以上の差が生じている。また、伝播速度は、グラウト充填前が5010～5040m/sec、グラウト硬化後が4420～4530m/secであり、グラウト充填前後の差は500m/sec程度認められた。

以上のことから、梁長さが30m程度のＰＣ鋼材のグラウト充填状況の評価においても、弾性波の入力手法や波形収録装置の改善を施すことによって、グラウト充填前後では入出力比および伝播速度に明確な差が生じており、衝撃弾性波法による調査手法は十分適用できることが分かった。

5）入力方法に関する考察

衝撃弾性波法は、主にＰＣ桁橋の横締め鋼材のグラウト充填状況を非破壊的に調査する手法として適用されてきた。横締めの場合、長さ10m前後のＰＣ鋼材が使用されていることが多く、弾性波の入力には、エネルギが小さくても指向性の良い、高周波成分を含む弾性波を入力するためにバネポインタを使用してきた。

都市内高速道路で建設されるＰＣ梁橋脚の場合は、長さ20m程度以上のＰＣ鋼材が使用されている場合が多く、横締め鋼材と同様の測定が可能か否かを評価する必要があった。

図-3.36は、バネポインタとハンマを用いた場合の入力側定着プレートの振動波形の卓越周波数をFFT解析で比較したものである。卓越する周波数は、それぞれ25kHz、4.5kHzとなっており、バネポインタの方が周波数の高い入力を与えられることが分かる。

一方、ハンマは卓越周波数が4.5kHzとバネポインタよりも低いため、伝播距離が長くなっても減衰しにくく、ＰＣ鋼材が20mを越えるような長さになっても、受振波の初期の立ち上がりを明瞭に把握できると考えられる。波形収録装置に関しても、伝播距離が長くなると受振波の初期の立ち上がり振幅が小さくなり、ノイズと区別しにくくなる。このためS/N比の大きな波形収録装置を使用すると、鋼材長さが大きくなっても衝撃弾性波の測定が可能になると考えられる。

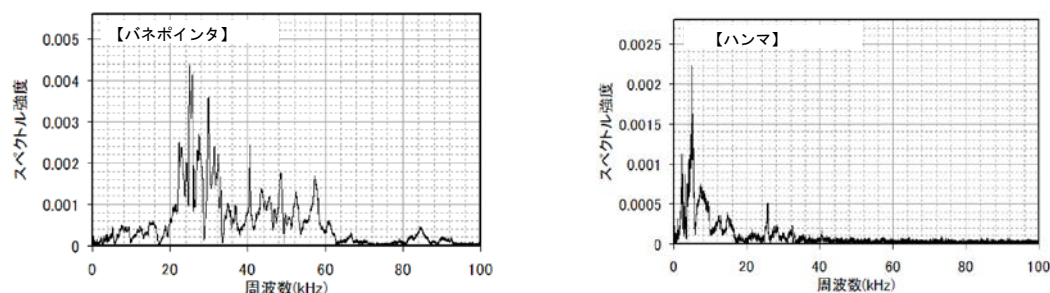



図-3.36　入力される弾性波の周波数分布の相違

6）伝播速度に関する考察

測定対象としたＰＣ梁橋脚の梁部分を以下のようなモデルに設定して、FEM解析を用いてハンマ入力した弾性波の伝播速度をグラウト充填前後で解析的に検討した。

コンクリート梁の形状は、縦1365㎜×横1365㎜×長さ28000㎜の立方体で、その中央に内径55㎜×外径56㎜×長さ28000㎜のシースを配置し、その定着部は**図-3.37**のような構造とした。

モデル要素は８節点ソリッドで、要素寸法はＰＣ鋼より線部分で約５㎜、コンクリート部分で約50㎜であった。物性値は既往の研究を参考に、**表-3.5**に示す値とした。

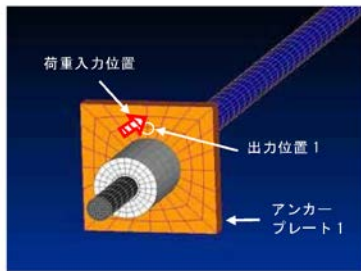



図-3.37　PC 鋼材定着部

表-3.5　物性値 (3-10)

	密度 (g/cm³)	ポアソン比	弾性係数 (GPa)	弾性波伝播速度 (m/s)
コンクリート	2.3	0.2	35.0	4112
PC 鋼より線	7.9	0.3	193	5735
グラウト	1.7	0.15	23.0	3780
シース	5.6	0.3	119	5348
アンカープレート	7.9	0.3	203	5881
カプラ	7.9	0.3	203	5881

ハンマ打撃による入力波形は、**図-3.37**の矢印位置の節点に半Sin波として入力したが、衝撃荷重の継続時間や最大荷重値は、直径20mmの鋼球を高さ100mm前後から自由落下させたと仮定して算出した。この結果、荷重の継続時間は66.04μs、最大荷重は1101Nとなった。

解析におけるサンプリング時間間隔は１μs解析時間は17000μsとした。**図-3.38**に受振側の速度波形を示すが、グラウト充填前には5520μsで到着した弾性波がグラウト硬化後には到達に6350μs要することになった。これから、伝播距離を28000mmとした時の伝播速度を算出すると、グラウト充填前が5072m/sec、グラウト充填後が4409m/secとなり、**図-3.35**に示した測定値とほぼ一致することが分かった。また、グラウト充填前の5072m/secは鋼材の棒波速度として妥当であり、グラウト充填後の4409m/secは鎌田らの参考文献とほぼ一致している。

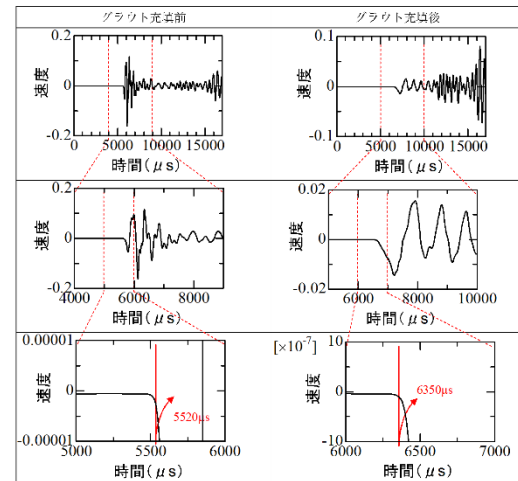



図-3.38　受振位置での速度波形

7) 試験のまとめ

建設段階におけるＰＣグラウト充填状況評価方法としても、以下の理由から衝撃弾性波法が有効であることが判明した。

①　ＰＣ鋼材長が30m程度であっても、衝撃弾性波を用いてグラウト充填の有無を評価できる。

②　ＰＣ鋼材長が、10m前後であればバネポインタのような高周波数成分の入力を与えるとよいが、20mを越えるような場合には低周波成分の入力を与えるハンマを用いる方が適している。

③　波形収録装置も、20m前後とＰＣ鋼材が長くなる場合には、S/N比の大きなものを用いると、ノイズの影響をうけにくくなって精度が高まる。

今後は入出力比の基礎となる伝播エネルギについても研究する必要があるのではないかと考えられる。

3.2　縦締めＰＣ鋼材のインパクトエコー法によるグラウト充填状況調査

3.2.1　供試体を用いた基礎実験

3.1 で記述したように衝撃弾性波法のうち、弾性波をＰＣ鋼材軸直角方向に発振させる手法であるインパクトエコー法を用いて、縦締めＰＣ鋼材のグラウト充填状況を検討した。これは主桁の主ケーブルでは、鋼材定着部が一般に主桁端部に配置されることから、橋架として完成すると定着部に点検員が容易に接近できないことが多いからである。すなわち、定着部近傍に発受振子を配置して、さらに定着部直近に弾性波を発振する衝撃弾性波法が適用できないため、シース近傍から弾性波を発振してその直近でシースからの反射波を受振するインパクトエコー方を使用せざるを得ないことが多いためである。この方法では点検員が調査したい測点に接近することができれば、その場所で弾性波の発振・受振が可能となるため、主桁主ケーブルのグラウト充填状況を縦波の多重反射から判定できるという利点を持っている。しかし、実際にインパクトエコー法を用いて、グラウト充填状況を評価した実構造物の事例はあまり報告されていない。これはインパクトエコー法がコンクリート構造物内部の空洞やひび割れを探査する手法としてアメリカで規格化されたことやグラウト充填状況判定手法としては、シースの大きさ、部材の大きさ等がわが国の実情と異なっているためではないかと考えられる。

本論文では、ＰＣ構造物のグラウト充填状況を非破壊的に把握する手法としてインパクトエコー法を取り上げ、その適用性について供試体や実構造物での測定を通じて検討を行った。

(1) 箱桁を対象とした実験

インパクトエコー法は**図-3.39**に示すように､測定対象の直上で打撃等により弾性波を入力し、そこに発生する縦波共振、すなわち多重反射を振動センサ等で測定する手法である。

【使用機器】　・センサ：ＡＥセンサ　AE-901S（エヌエフ回路設計ブロック社製）
　　　　　　　・増幅器：プリアンプ　9913（エヌエフ回路設計ブロック社製）
　　　　　　　・波形収録装置：マルチレコーダー　GR-7000（KEYENCE製）

グラウト充填状況の調査に用いる場合、シース内にグラウトが充填されている鋼材では、反射波の FFT 解析では板厚のエコーしか現れない。これに対しシース内にグラウトが充填されていない鋼材がある場合、シース中の空気層との界面で弾性波が反射されシース位置からのエコーも発生する。

このようにインパクトエコー法では、縦波共振の多重反射をどのように把握できるのかが測定精度に大きな影響を与えるので、板厚の周波数ピークを測定できているかをまず確認することが重要である。

従来のシースのかぶりから想定される周波数帯域にピークがどのように現れるかで、「充填」、「未充填」の判定を行う方法では、判定者の経験や個人差が生じやすい。そのため測定された反射波形から、グラウト充填状況を機械的に判定するソフトを開発することで、インパクトエコー法のデータ処理能力を高めようと試みた。

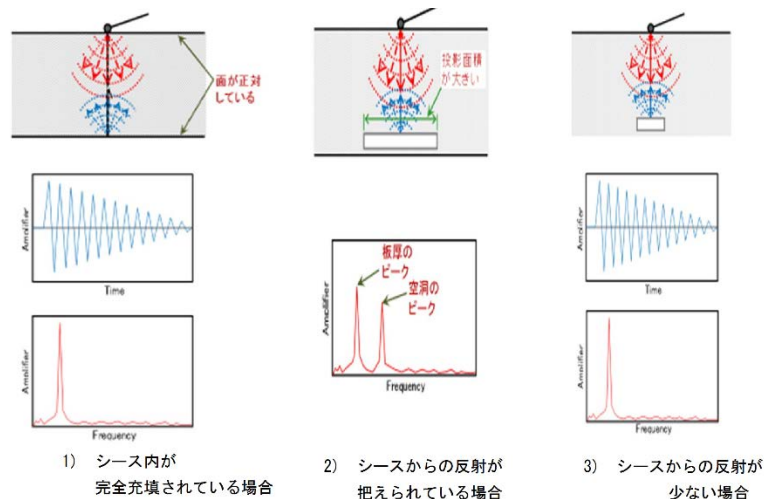



図-3.39 インパクトエコーの特性

1） 供試体による基礎実験

供試体の板厚は 300mm、幅 1250mm、長さ 1200mm で、その形状は**図-3.40** に示すようなコの字変形型である。用いたシース径はφ35、φ65mm の２種類でかぶりは 70～180mm と変化させた。

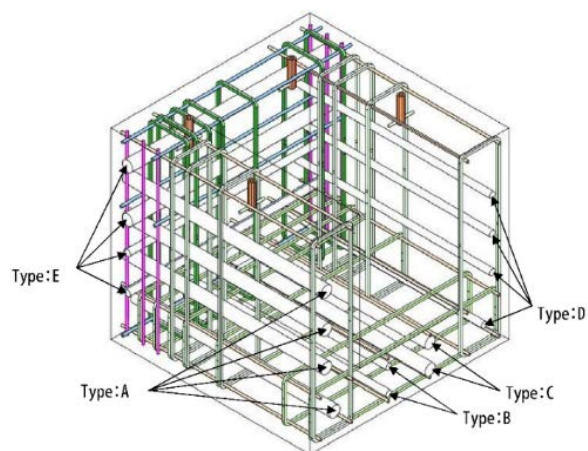
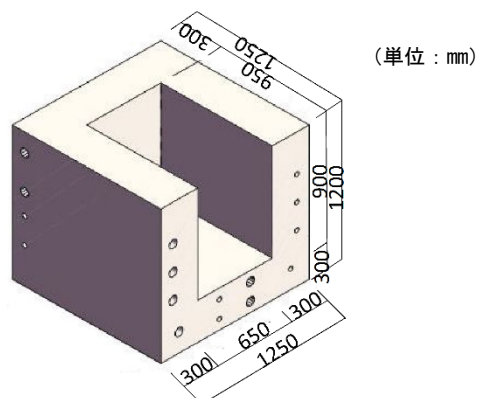



図-3.40 供試体の外観形状

① シースかぶりが小さい場合について

インパクトエコー法を用いた主ケーブルのグラウト充填状況判定手法は、インパクトエコー法の原理上、空洞からの縦波共振の多重反射が明確に検出できない要因が生じれば、判定を見誤る可能性が高くなる。下記に示す a、b、c については特に、判定の評価に与える影響が大きい課題であり、それらの課題に対して以下の検討を行った。

a.周波数解析を行う範囲

b.縦波共振現象の把握

c.供試体の側面からの乱反射の影響

a.周波数解析を行う範囲

供試体の測定結果から、鋼材番号 A-1,D-1 のかぶりの浅い側（70mm、80mm）の判定において、グラウトは「未充填」であったにも関わらず、「充填」と逆の評価を示す結果となった。改善の第1段階として、解析範囲に着目し、波形処理方法について検討を試みた。

鎌田らの研究によれば、Sansalone らの提案に従って、受振波形において、コンクリート表面を伝播したＰ波および表面波の振幅電圧を０Ｖとみなす波形処理を行って、FFT により周波数分布を算出する方法が、高周波成分を減少させることができるとされている。

本実験では、表面波の影響を少なくするために、解析範囲として第１振幅目をカットし、そこから 512μsec の解析幅で FFT 処理を行っている。しかし、シースまでのかぶり深さが浅い場合には、このカットした部分にシースからのエコーが含まれていると想定される。そのため**図-3.41** のように、解析範囲の開始位置を変更し、a)従来の第一振幅目をカットしたパターン、b)第一振幅目をカットしないパターン、c)最大振幅位置からのパターンの３パターンで解析を行って比較した。

a)第１振幅カット有りパターン　b)カット無しパターン

c)第１振幅最大振幅位置からのパターン

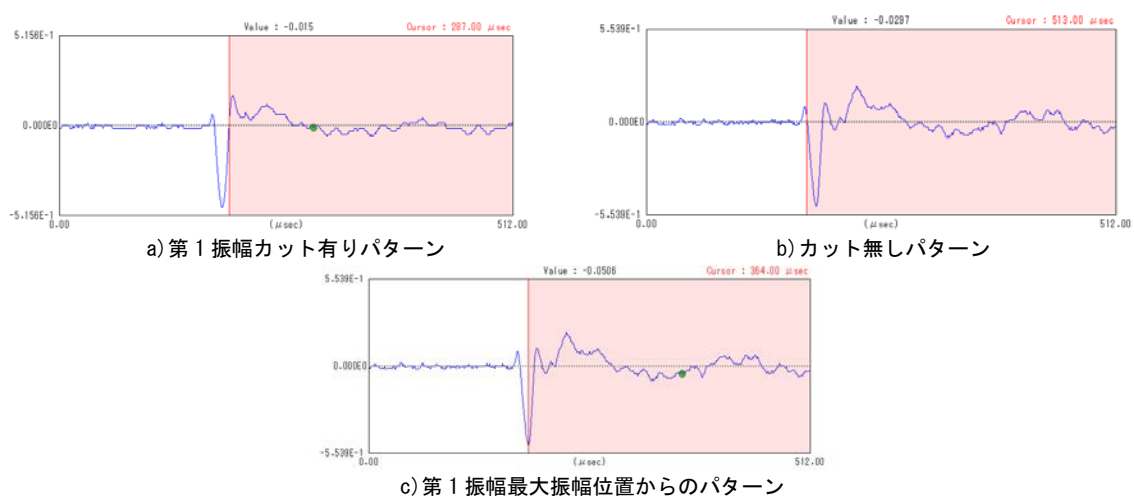



図-3.41　解析範囲開始位置

検討結果を**表-3.6** に示す。

第１振幅をカットしたパターンでは、３回とも全て誤評価であったが、b)カット無しのパターンでは、鋼材番号 D-1 では「判定不能」があるものの、鋼材番号 A-1 では「未充填」と評価できている。

シース径とかぶりの関係から考えて、かぶり／シース径＜１の範囲内では、第一振幅目をカットしない処理方法の方が有効な手段であると考えられる。

本実験の範囲内では、かぶり／シース径が変化すると、評価は、受振波形の FFT 解析対象範囲

を次のように変化させた方が、空隙からの反射周波数を明確に把握できる可能性があるが、その閾値は今後さらにデータを収集して検討していく必要があると思われる。

【本実験結果からの提案】

かぶり／シース径＜1

・・・・第一振幅目カットなし

かぶり／シース径≧1

・・・・第一振幅目カット

かぶり／シース径＞3～4

・・・・インパクトエコー法適用不可

（文献等により）

表-3.6　検討結果一覧

解析パターン	鋼材番号	かぶり(mm)	グラウト充填状況	測定回数	グラウト充填度評価
a) 従来のカット有り	A-1 φ65mm	70	未充填	1回目	○
				2回目	○
				3回目	○
	D-1 φ35mm	85	未充填	1回目	○
				2回目	○
				3回目	○
b) カット無し	A-1 φ65mm	70	未充填	1回目	×
				2回目	○
				3回目	×
	D-1 φ35mm	85	未充填	1回目	△
				2回目	△
				3回目	△
c) 最大振幅位置	A-1 φ65mm	70	未充填	1回目	○
				2回目	○
				3回目	○
	D-1 φ35mm	85	未充填	1回目	○
				2回目	×
				3回目	×

※ 充填度評価　○：充填　△：判定不能　×：未充填

b.縦波共振現象の把握

現在の解析方法では、受振波形をFFT変換して、そのパワースペクトルからピーク周波数を読み取ることを前提としている。FFT 変換では無限に繰り返される信号の１周期分を扱っていると仮定しているので、サンプリング記録の有限性は元の連続時間の信号とはことなるスペクトル特性を持つことになる可能性がある。これを避けるために窓関数を使用してピーク周波数をより際立たせる処理をしている事例がある。そこで文献等で発表されている、窓関数の一つMultitaper Method（MTM：マルチテーパー法）によりTS供試体での測定波形を処理することとした。

・波形処理方法

以下に示す①～④それぞれの測定結果（元波形）に対して、次のA～Cの３種類の波形処理を行った。

A:元波形（測定結果そのもの）

B:表面波の振幅を０とした場合の波形

C:表面波の振幅を０とした上で、500μsec.以降の振幅を０とした場合の波形

・解析の対象としたケーブル（径４本）

①　A面　シース直径:65mm　かぶり70mm未充填

②　A面　シース直径:65mm　かぶり70mm完全充填

③　D面　シース直径:35mm　かぶり85mm未充填

④　D面　シース直径:35mm　かぶり85mm完全充填

解析結果を**図-3.42～図-3.44**に示す。これらを観察すると、元波形をMTM解析したものの方が明瞭な周波数分布となった。

MTMによる解析では生成されているピークはなだらか（平滑化）になる傾向にあり、成分の少ない周波数はより成分が少ない結果を示し、成分の大きい周波数はより強調される結果となる。そのため解析手法を駆使しても測定時の受振波形に依存する部分が多く、元波形の収録（データ採

取）が重要であり、その時点で波形の良否を見極め、手法の検討が必要であると判断された。

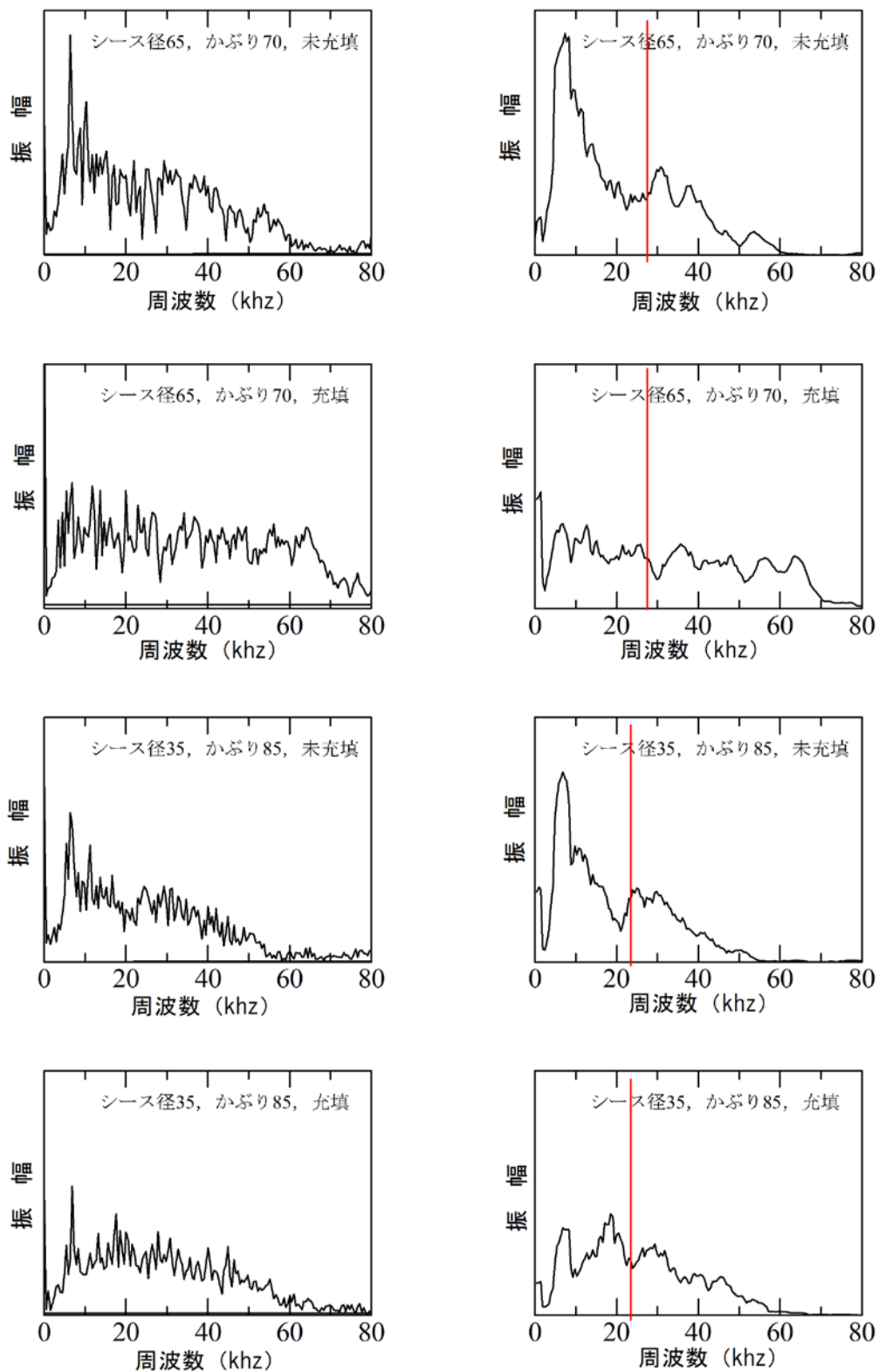



図-3.42　　波形の解析結果

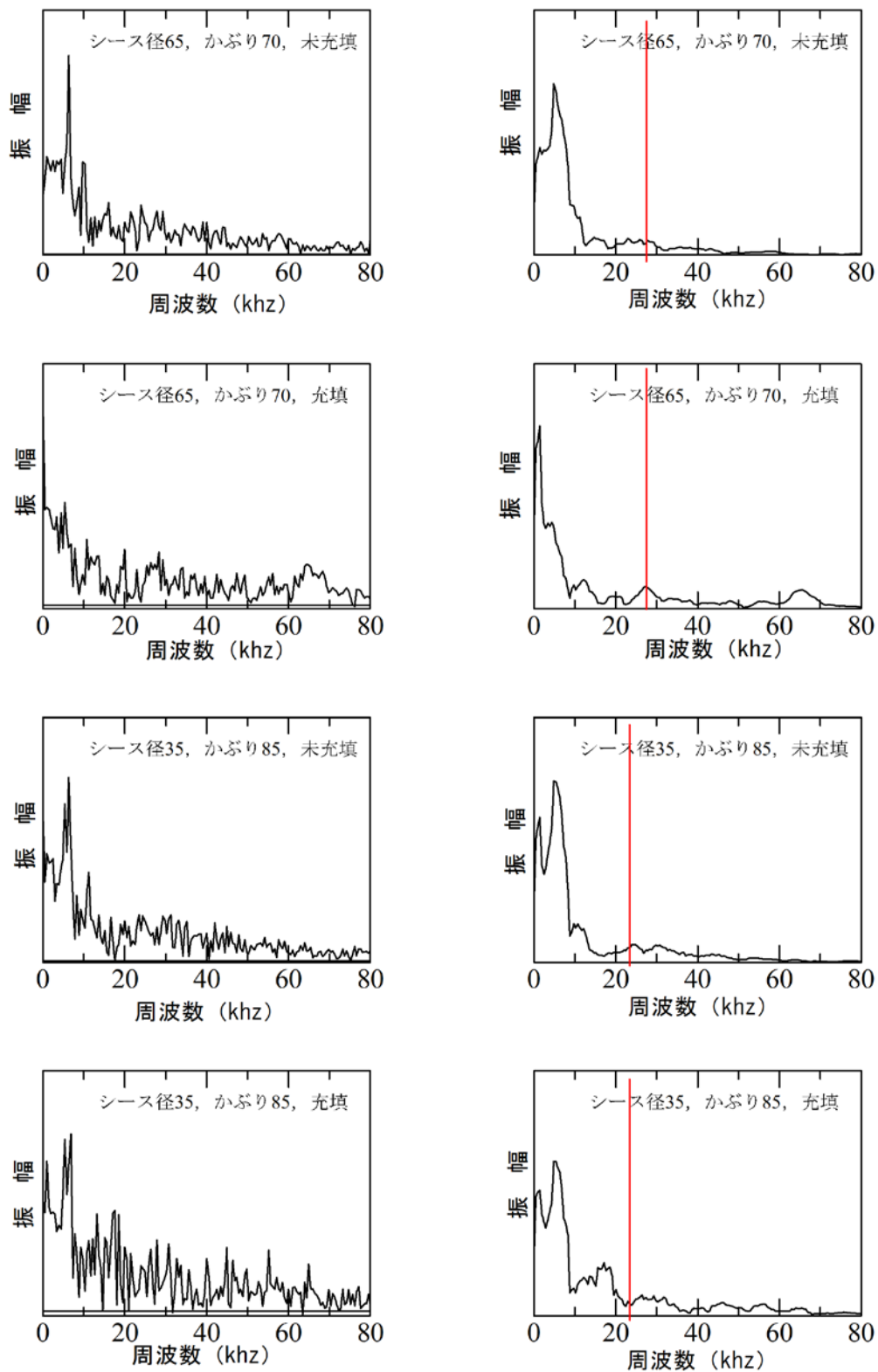



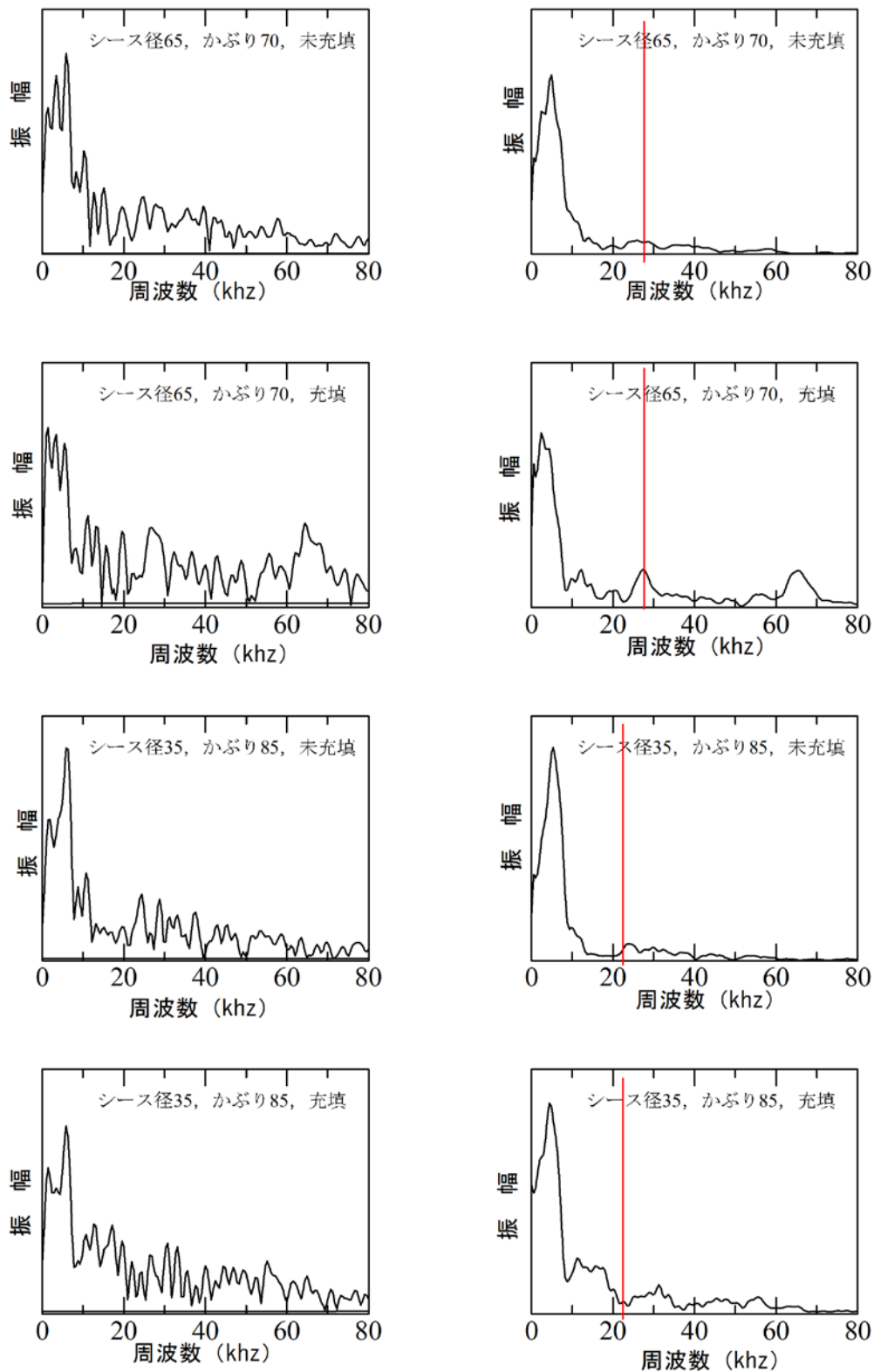
図-3.43　表面波の振幅をカットした波形の解析結果

表面波+500μ以降カットの波形をFFT　表面波+500μ以降カットの波形をMTM

図-3.44　　表面波および500μsec.以降の振幅をカットした波形の解析結果

c. 供試体の側面からの乱反射の影響

縁端部の近傍でインパクトエコー法を実施すると、その縁端部からの反射波の影響で、シースからのエコーが不明瞭になる。Sansalone らの研究によれば、構造形式がＩ桁の場合におい、「ウェブ高さおよび幅が、厚さの５倍以上であれば、一つの版と見なして試験できる」とされている。しかし、実際の現場ではそのような広い面積を確保できるようなケースは限られている。供試体を用いて、その影響範囲がどこまで及ぶのか検討を行った。

図-3.45 は鋼材番号 A-1,A-2 のグラウト充填、未充填に対し、縁端部から、50mm 間隔で順次遠ざけていき(スタート位置は縁端部から 100mm の地点)、300mm まで順次測定を行った結果を示したものであり、その周波数分布の性状に着目した。その結果、100～250mm までは、網掛けで示す周波数帯に縁端部からの反射波と考えられるピーク周波数が検出されている。それに対して、測点位置 300mm では、ピーク周波数は検出されていない。縁端部からの影響範囲は300mm程度までと考えられる。

図-3.45　部材端部からの反射の影響範囲の検討結果

実橋 OT 橋りょうの結果においても、全ての測定位置の結果を「充填」と考えると、300mm 以下では、「不充填」と評価しているケースが多い。このことからも、端部横桁や下面等から、最低でも 300mm 程度の距離を離しておけば、その影響はかなり軽減できると考えられる。

図-3.46 に測定結果の例として、グラウト未充填時（グラウト無し＋ＰＣ鋼材あり）のシースに、管内を滞水させた場合の影響を検討した結果を示す。

弾性波伝播速度 4320m/s、版厚 400mm、シースまでのかぶりは 148mm である。どちらの周波数解析結果からも版厚位置、およびシース位置からの反射波と考えられる 5.4kHz、14.6kHz で周波数ピークは観察されている。しかし、管内が滞水しているケースの方が、シースからの反射波位置での周波数ピークが小さい。シース内の空隙が大きい場合、ここが滞水しても空気よりは密度が大きいことから、空隙のままよりもスペクトル強度が小さくなるような傾向があるといえる。

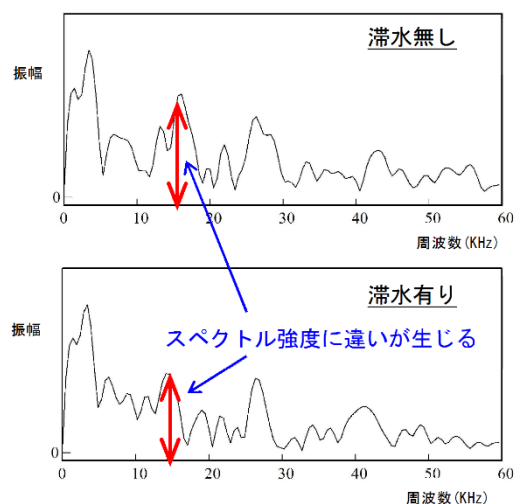



図-3.46　周波数分析結果

2）判定システムの開発

供試体での基礎実験で得られた知見を基に、グラウト充填状況判定システムの開発を行った。判定システムは、**図-3.47** のように、画面上段に原波形を表示し、下段には指定した区間について周波数数分析のできる FFT 解析で行える機能を備えている。グラウト充填状況の判定は「充填」、「未充填」、「判定不能」の３つの区分で評価することとした。

判定基準に用いている主なパラメータは、供試体での基礎実験でも認められたシース位置からの反射波の有無と、その位置でのスペクトル強度の強弱である。シース位置からの反射波において、ある程度の幅を持たせた周波数の範囲内でピークが検出されなかった場合、判定は「充填」と評価される。それとは逆に、周波数ピークが顕著に検出された場合には「未充填」となる。想定した周波数範囲外で顕著な周波数ピークが認められた場合や、周波数ピークが多数検出された場合等、何らかの他の要因が絡み合っていると推察される場合には、「判定不能」となる評価にすることとした。

図-3.47　グラウト充填状況判定システム
（判定不能）

以上の供試体での基礎実験および実橋での試験的な測定を経て、インパクトエコー法を用いたグラウト充填状況の判定が有効であると考えられたが、実構造物での検証事例が少ないことから、データの蓄積を行うことで、精度の高い非破壊試験法となる可能性があると考えられる。

（2）Ｔ桁を対象とした実験

Ｔ桁ウエブや道路橋床版のように薄い部材では、板厚の縦波共振が強く現れるため、その影響

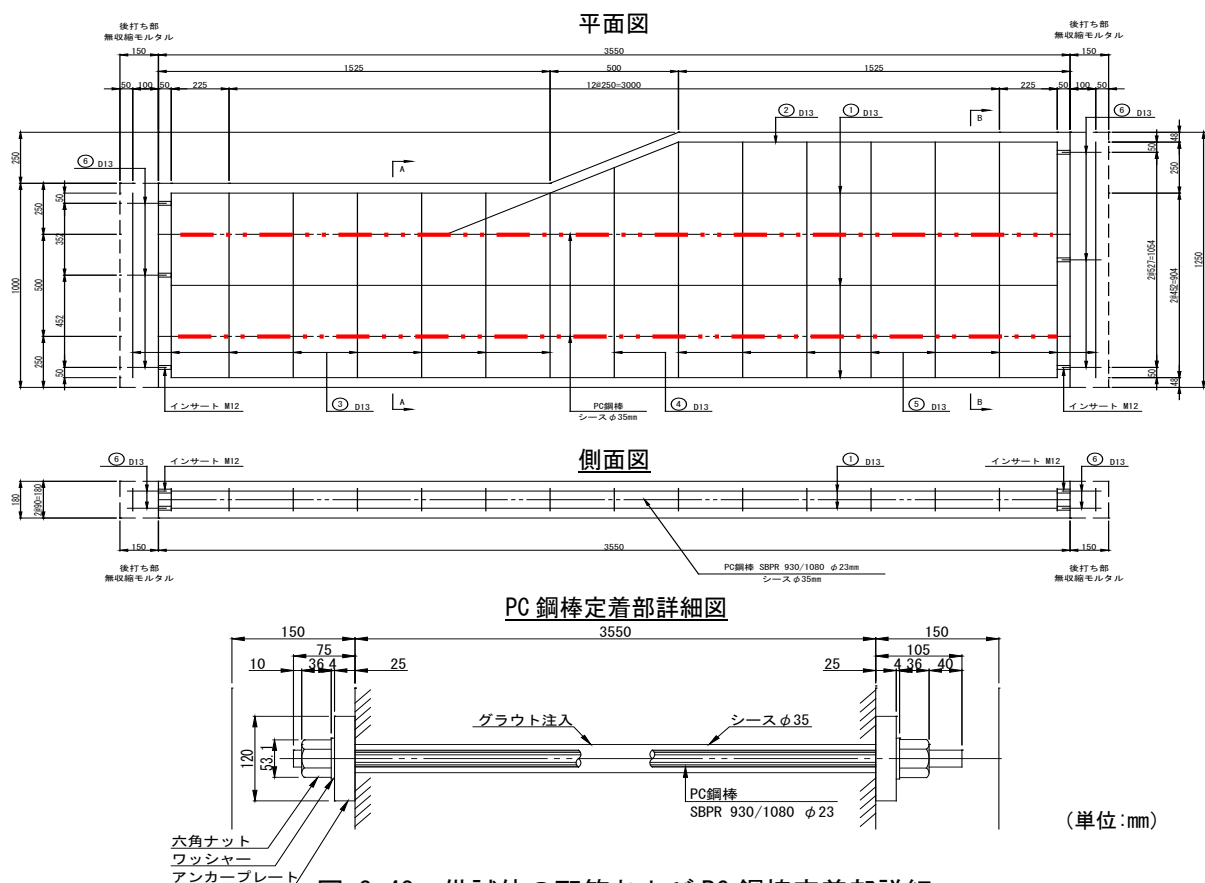
でシースの縦波の検出が難しくなることがあり、薄い部材と細径シースの組み合わせはインパクトエコー法の適用が非常に難しい条件であるので、このような場合の充填状況の判定精度を向上させるため実証実験を行った。

【使用機器】　・センサ：ＡＥセンサ　AE-901S（エヌエフ回路設計ブロック社製）
・増幅器：プリアンプ　9913（エヌエフ回路設計ブロック社製）
・波形収録装置：マルチレコーダー　GR-7000（KEYENCE製）

実験には、**図-3.48** に示すような 180×1000～1250×3750mm の床版モデル供試体２体を使用したが、これらは床版やＴ桁橋のウエブをモデル化したものである。横締めＰＣ鋼棒としては、φ23mm、長さ 3,750mm、鋼製スパイラルシース径φ35mm が 180mm の版の中央に 2 本埋め込まれており（シース純かぶり 72.5 mm）、グラウト充填状況は、**表-3.7** に示すように４種類である。

表-3.7　供試体のグラウト充填条件

供試体 No.	上段ＰＣ鋼棒	下段ＰＣ鋼棒	備　考
No.1	充填	不良Ⅰ (部分的充填不良)	下段鋼棒は端部の 0.5m(定着長の 14%) が未充填
No.2	未充填	不良Ⅱ (1/2 断面の充填不良)	下段鋼棒は全長にわたってシース断面の 1/2 が未充填

図-3.48　供試体の配筋およびPC鋼棒定着部詳細

床版モデル供試体の板厚は 180mm で、道路橋で使用されるＰＣ桁のウェブと同等、シースの径は古いＰＣ橋の一般的なシースよりも細いΦ35mm で、薄い部材と細径シースの組み合わせといえる（シース径Φ35mm／部材厚 180mm＝19%)。この供試体の充填鋼棒と未充填鋼棒の直上で測定したインパクトエコー法の周波数スペクトルを**図-3.49** および**図-3.50** に示す。なお、端面からの反射波の影響をできるだけ抑えるため、充填鋼棒および未充填鋼棒ともに打撃と測定点は供試体の中央付近とした。

未充填鋼棒の周波数スペクトル（**図-3.49**）には、シースかぶりの縦波共振周波数の理論値（11.4kHz）付近に、充填鋼棒（**図-3.50**）にはない盛り上がりがあることから充填不良の可能性が高いと判定できる。しかしながら、この盛り上がりは明確なピークではないため、比較対象がないと判断に迷う可能性もある。

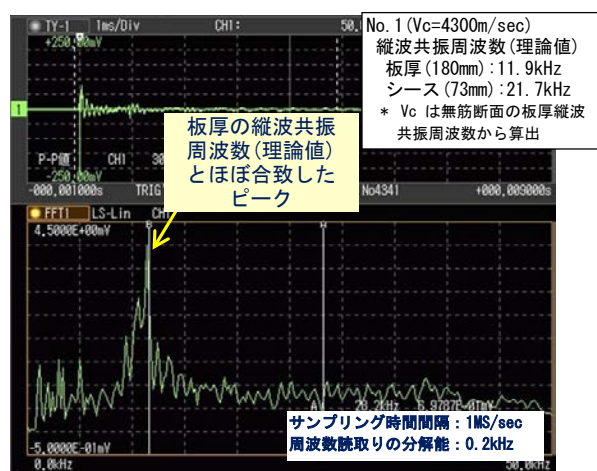



図-3.49 充填鋼棒の周波数スペクトル

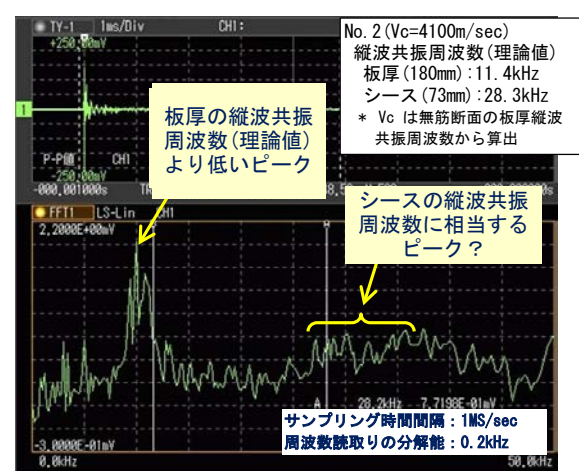



図-3.50　未充填鋼棒の周波数スペクトル

一方、板厚の縦波共振に相当する周波数付近においては、充填鋼棒では先鋭なピークが現れているのに対し、未充填鋼棒では複数のピークが現れており、もっとも卓越したピークの周波数は理論値よりも 1.5kHz ほど低い値であった。この現象は、弾性波が伝播経路上にある未充填シース（空洞）を迂回するために生じたものではないかと考えられる。

薄い部材においては、細径のシースでも断面に占める割合が厚い部材よりも大きいので、充填シース（弾性波がシースを透過）と未充填シース（弾性波がシースを迂回）では伝播距離の差が大きくなり、板厚の縦波共振周波数の変化が明瞭になると思われる。今回の実験結果からは、部材厚に対するシースの占める割合が 20%程度あれば、板厚の縦波共振のピークの形状や周波数の変化を指標としてグラウトの充填状況を判定できる可能性があると考えられた。

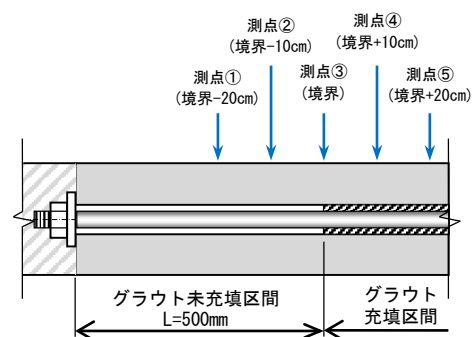



図-3.51　グラウト未充填境界付近での測定

これを検証するために、不良Ｉ鋼棒（No.１ 下段鋼棒）のグラウトの未充填部と充填部でインパクトエコー法の測定を実施したところ、未充填部では板厚の縦波共振周波数のピークが理論値よりも 1.5kHz ほど低い周波数に現れた（**図-3.51** および**表-3.8** 参照）。一方、充填部においては、理論値と合致する周波数にピークが現れたが、それよりやや低い周波数にも類似のピークが現れており（ピークの二分化）、とくに未充填部との境界ではピークの大きさが同等であるため判定にはかなりの熟練を要すると思われる。

表-3.8 グラウト充填境界付近での測定結果

測 点	周波数スペクトル		充填状況の評価	備 考
	シースの縦波共振	板厚の縦波共振		
測点① (境界-20cm)	ピーク不明瞭	理論値より低い周波数	充填不良	
測点② (境界-10cm)	ピークやや不明瞭	計算値より低い周波数	充填不良	
測点③ (境界)	ピーク不明瞭	ピークが二分化	充填不良の可能性	同等のピークが２つ現れる
測点④ (境界+10cm)	ピーク不明瞭	理論値と合致した周波数	充填	板厚ピークがやや二分化
測点⑤ (境界+20cm)	ピーク不明瞭	計算値と合致した周波数	充填	板厚ピークがやや二分化

これまでは精度良く判定することが難しかった薄い部材のグラウト充填状況調査だが、従来の判定指標であるシースの縦波共振の有無に加えて、板厚の縦波共振周波数付近の変化にも着目すれば、判定精度の向上が図れる可能性がある。

3.2.2 実橋におけるグラウト充填状況調査事例

(1) 箱桁を対象とした測定事例

判定システムを用いて、実構造物でグラウト充填の調査を実施した。調査は桁長 228m の３径間連続鉄道ＰＣ箱桁で、グラウト不充填となりやすい主桁主ケーブルの上縁定着部付近で実施した。

表-3.9 実橋梁での測定結果

径間	ｹｰﾌﾞﾙ番号	測点	定着端距離(mm)	かぶり(mm)	グラウト充填状況評価[1)]	削孔結果その他
P4-P5	SSk230	①	2550	95	○	○
	SSk231	①	2450	95	○	×
		②	4900	84	○	○
	SSk232	①	2050	107	○	×
		②	3850	74	×	○ 表面ひび割れ
	SSk233	①	4600	100	○	×
		②	4650	87	○	○
	SSk234	①	2550	92	○	○
		②	3060	92	○	
		③	3340	92	○	
		④	3490	92	△	削孔：充填
		⑤	3830	90	○	
	SSk236	①	3050	110	○	○
	SSk238	①	3100	152	○	○

※ 充填状況評価 ○：充填 △：判定不能 ×：未充填
※ 1)測定は３回行っており、同じ評価が２回得られたもので評価を行った、２回得られなければ「△：判定不能」とした

コンクリートの弾性波伝播速度は実測値より 4300m/sec、版厚は 750mm である。**表−3.9** に判定の結果を示す。

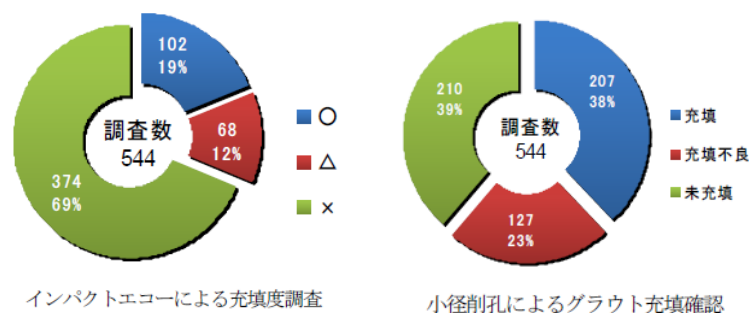
この橋梁では、インパクトエコー法のグラウト充填状況評価と削孔結果とが一致しない箇所が、５箇所あったが、そのうち４箇所はシースからの反射が認められなかったことから、充填と判定したもので、シース位置からの反射の有無だけで、グラウト充填状況を判定するのは、誤差を伴いやすく、何らかの手段を追加して判定する方法を検討する必要がある。

（2） Ｔ桁を対象とした測定事例

インパクトエコー法を用いたグラウト充填状況調査を行った事例を紹介する。

1） 塩害橋における事例

当該橋梁は、1974 年に建設された湖面を渡るポストテンション方式のＰＣ橋で、Ｂ活荷重対応を目的とした外ケーブル補強工事を実施している中、その補強工事用足場を利用して、橋梁点検を実施したところ、顕著なコンクリートの浮きが発見され、その部分で主桁主ケーブルの一部で塩害劣化していた。同橋梁は大部分がポストテンションＴ桁橋であり、設計年次の関係で主鋼材３本が桁上縁定着となっていた。

ＰＣ鋼材の著しい腐食と破断が発見された主鋼材ＰＣ鋼より線上縁定着されており、このようにグラウト完全充填が難しい、曲げ上げ鋼材について、まず、インパクトエコー法で 544 箇所の測定を行い、グラウト再充填のためにシース内のＰＣ鋼材の腐食状況を確認するための削孔も行ったので、その結果も合わせて**図−3.52** に示す。

図−3.52 グラウト充填状況調査結果の比較

ここでは、インパクトエコー法の評価として、○:グラウトが充填されている、×:グラウトがほとんど充填されていない、△:グラウトの形跡はあるが未充填と思われる、の３段階に分類した。非破壊試験法の調査結果では、ＰＣ鋼材の約７割でグラウト未充填と思われる結果となった。小径削孔による調査結果では、約４割が未充填、約２割がやや充填不良となった。この結果より、インパクトエコー法は、完全充填に関しては少し厳格な評価をしている傾向が見られた。

2） ＡＳＲ橋における事例

当該橋梁は、1970 年代に建設されたポストテンション方式ＰＣ道路橋で、近年の定期点検で、主桁下フランジや主桁端部にひび割れ幅が 0.2mm を超える変状が発見された。学識経験者を加えた

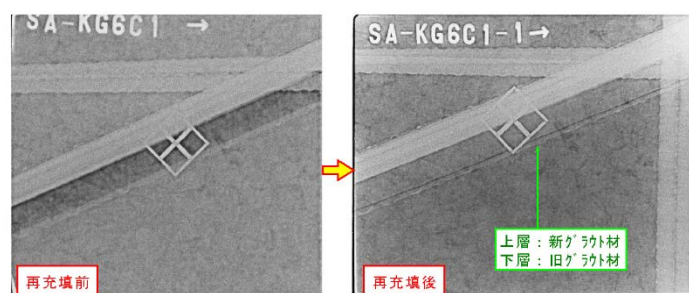
詳細調査や、応急的なひび割れ注入等の補修工事が実施された[3-11]。

当該橋梁では、ひび割れの主たる原因はアルカリシリカ反応による劣化と、主ケーブルのグラウト充填不良であることが判明していた。また、当該橋梁では、主桁上縁定着ケーブルが配置されており、当面の対策として、グラウト充填不良部の調査が急がれた。

グラウト調査方法として採用された非破壊試験方法は、X線透過法とインパクトエコー法とであった。グラウト充填調査全数（N=544）に対して、270 箇所でグラウト充填不良が確認された。**表−3.10** に示すように、グラウト充填不良は橋梁ごとにバラツキが大きく、38.5～74.4％であった。削孔・CCD 法およびX線透過法による直接的な検証を実施した箇所において、インパクトエコー法で充填（○）と判定し、削孔 CCD 法による検証で充填不良となる危険側の誤判定は皆無であった。一方、インパクトエコー法で充填不良（×、△、※）と判定し、削孔・CCD 法による検証で充填されていた箇所は全数の９％程度であり、高い的中率であった。また、グラウト再充填後、インパクトエコー法やX線透過法でグラウトが再充填されていることが確認できた。この事例においても、インパクトエコー法は充填ケーブルを充填不良とする判定例が約 9％程度あったが、充填不良ケーブルを充填ケーブルと危険側に誤判定することは皆無であった。

表−3.10　調査結果一覧

橋梁名等		船場川		玉手	水尾川		合計
（調査対象数量）		上り (144)	下り (144)	上り (96)	上り (80)	下り (80)	(544)
過年度調査済		22	0	15	23	0	60
IE法判定	充填(○)	37	56	15	9	16	133
	充填不良の可能性(△)	30	52	25	17	26	150
	充填不良(×)	33	24	21	23	12	113
	評価不能(※)	22	12	20	8	26	88
	計	122	144	81	57	80	484
削孔･CCD法対象数量	IE法の判定 △, ×, ※	85	88	66	48	64	351
	過年度調査(未充填判定)	14	0	0	18	0	32
	IE法･過年度調査 ○判定　試削孔	2	6	6	5	1	20
	計	101	94	72	71	65	403
削孔･CCD法判定	充填(●)	36	45	35	10	7	133
	充填不良小(▲)	15	12	9	15	8	59
	充填不良大(△)	50	36	28	46	49	209
	未充填(×)	0	1	0	0	1	2
	計	101	94	72	71	65	403
ケーブル腐食度	Ⅰ（黒皮又は薄い錆）	54	37	57	42	48	238
	Ⅱ（部分的浮き錆）	18	6	4	21	11	60
	Ⅲ（全周又は全長に浮き錆）	1	0	0	4	1	6
	計	73	43	61	67	60	304
空圧法の実施数量	削孔法の判定 ×, △, ▲	65	49	37	61	58	270
シース内の環境調査	湿度	65	49	37	61	58	270
	グラウト採取塩分調査	4	4	4	4	4	20
	水分採取塩分調査	2	0	0	2	3	7
X線透過調査		6	6	7	7	7	33
上縁定着部　後打ちコンクリート劣化状況確認		1	1	0	0	0	2
グラウト充填不良	削孔法の判定 ×, △, ▲ (%)	114 (39.6%)		37 (38.5%)	119 (74.4%)		270 (49.6%)

※ ［青枠］IE法検出精度対象箇所 ，［赤枠］橋梁別　グラウト充填不良率

写真−3.7　再充填確認（X線透過法）

3.3　本章のまとめ

本章では、ポストテンション方式ＰＣ構造物のグラウト充填状況を評価する非破壊試験法を、横締めＰＣ鋼材と縦締めＰＣ鋼材とに区分して検討を行った。本章で得た結果を整理すると以下のようになる。

(1) ＰＣ鋼棒破断時の第三者被害を防止するためには、鋼棒の全長の半分以上がグラウトに保護されていれば、その摩擦で破断しても飛び出しは少ないことを実験的に確かめており、完全にグラウト充填されている場合と、逆にほとんど充填されていない場合は、衝撃弾性波法で明確に区別できる。

(2) 衝撃弾性波法では、グラウト充填状況の評価を横締めＣ鋼材の全長に対して　平均的にグラウトが充填されているか、否かを判定できることが重要であり、Ｘ線法やインパクトエコー法のように試験対象点の充填状況を詳細に評価しようとするものではない。

(3) 衝撃弾性波法は、他の非破壊試験方法と比べて、いささかラフな判定を行うものではあるが、定着部の後埋めコンクリートをはつる必要がなく検査できること、横締め鋼材のように多数配置されている対象物を効率的に点検できるという面では十分実用的な手法といえる。

(4) 衝撃弾性波法は、建設時のように定着部を露出させた状態で計測できる場合であれば、鋼材長さが 30m前後でも、あるいはカップラで接続されていても、グラウト充填状況を評価することができる。

(5) 本論文で提案した縦締めＰＣ鋼材のグラウト充填状況を評価するインパクトエコー法は、測定や解析の基本はすでにアメリカで、ひび割れや空隙の検出方法として確立された方法であり、入力した弾性波の縦波共振を、その反射波のスペクトルピークと関連づけて、板厚や空隙の有無を判定するものである。

(6) インパクトエコー法ではグラウト充填状況の判定基準に用いているのは、シースや板厚位置からの反射の有無と、その位置でのスペクトル強度の大小である。したがってシース位置を正確に測定できることが前提となるが、それには鋼材位置探査の精度が重要であるため、実際にはある程度の幅をもたせた周波数の範囲でピークを検出できるか否かが重要である。ここでピークを特定できれば「未充填」となるが、周波数ピークが多数検出された場合は「判定不能」となる。

(7) わが国の古いＰＣ構造物のようにφ40㎜ 程度とシース径が小さな場合や、シースが浅い位置にある場合には、シースからの反射波が小さくなるので、空隙があっても充填と判断する可能性があり、反射波の読み取り方等に工夫が必要である。

(8) 板厚の薄い部材ではグラウト充填状況が不良の場合、板厚相当のピークが計算値より低い位置に出やすく、シース位置でのピークがやや不明瞭となる。グラウトが充填されていると板厚のピークが２分化するだけでなく、シース位置のピークも不明瞭となる傾向があることから、板厚の共振ピークの形状や周波数の変化からグラウト充填状況を評価できる可能性がある。

(9) インパクトエコー法では板厚やシース位置からの反射だけでなく、部材の境界面やシース周囲の空隙等からの反射や散乱の影響を受けるため、測定位置そのものを十分に吟味することで、不要な影響を除去するようにする必要がある。またスペクトルを FFT 変換して求めるだけでなく、MTM のような窓関数を用いることでピークの表示が変化して測定しやすくなる可能性もある。

【参考文献】

3-1)　葛目和宏、真鍋英規、蔀　直樹、伊藤博幸、宮川豊章：衝撃弾性波法を用いたＰＣグラウト充てん度評価に関する考察、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、第 12 巻、pp.349-356、2012.11.

3-2)　望月秀次、本間淳史、上東　泰：ＰＣグラウトの施工技術の現状と非破壊検査による点検、コンクリート工学、Vol.34、No.6、pp.4-13、1996.6

3-3)　斎藤宏行、尼崎省二：衝撃弾性波法によるＰＣグラウト充填評価に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21、No.2、pp.1267-1272、1999

3-4)　鎌田敏郎、淺野雅則、国枝泰祐、国枝　稔、六郷恵哲：弾性波特性パラメータを用いたＰＣグラウト充填評価手法、土木学会論文集 No.746、V-61、pp.25-39、2003.11

3-5)　小林和夫：ＰＣ構造物の補修、コンクリート工学、Vol.37、No.2、1992.2

3-6)　鎌田敏郎、淺野雅則、川嶋雅道、内田慎哉、六郷恵哲：弾性波によるＰＣグラウト充填評価手法の実構造物への適用、土木学会論文集 E、Vol.62、No.3、pp.569-586、2006.9

3-7)　山田和夫、黒野幸弘、中井裕司：ＰＣ鋼棒中を伝播する弾性波の伝播特性に及ぼす緊張力の影響に関する基礎的研究、セメント・コンクリート論文集、No.49、pp.534-539、1995

3-8)　應江虹、鎌田敏郎、浅野雅則、六郷恵哲：弾性波によるＰＣグラウト充填評価法の適用性に関する解析的考察、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.26、No.1、pp.1900-1904、2004

3-9)　葛目和宏、前野裕文、森下宣明、塚田卓、梅原秀哲：打音振動法によるＰＣグラウト充填状況評価について、コンクリート構造物のアップグレード論文報告集、Vol.6、pp.393-400、2006.

3-10)　葛目和宏、木村清敏、前野裕文、榊原浩孝、梅原秀哲：衝撃弾性波法によるＰＣ橋脚のグラウト充填状況評価について、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文集、第 11 巻、pp.241-246、2011.11.

3-11)　吉安勇介：国道 2 号姫路バイパス高架橋の老朽化による損傷事例について、近畿地方整備局研究発表会論文集、防災・保全部門 No.14、2009

第４章　アルカリシリカ反応が顕在化した構造物の非破壊検査方法

4.1　斜角法によるコンクリート構造物内部の非破壊検査

4.1.1　アルカリシリカ反応による構造物内部の劣化調査

鉄筋破断が発見されるまでは、アルカリシリカ反応によって発生したコンクリート構造物のひび割れは、表面から鉄筋位置までであって、鉄筋が適切に配置されている場合には部材内側へはひび割れが進展せず、構造物の耐荷性能に影響を与えることは少ないとされてきた。しかし、2000年に入り阪神高速道路のＲＣ橋脚で鉄筋破断が発見され、さらに2002年にＲＣ橋脚とＰＣ梁橋脚でスターラップ曲げ加工部で鉄筋破断が確認された[4-1]。

2003年にNHKが「クローズアップ現代」でアルカリシリカ反応によるコンクリートの劣化に関する特集を組み、鉄筋破断現象が取り上げられた。これらを背景に行われた2005年の土木学会コンクリート委員会の調査[4-2]によれば、アルカリシリカ反応によって過大な膨張が発生したコンクリート構造物では、Ｔ型橋脚梁部分のスターラップ筋および折り曲げ筋のようなせん断補強筋の曲げ加工部や、主鉄筋端部の曲げ加工部等のコンクリート部材の隅角部付近での破断事例が多いことが報告されている。鳥居らの研究[4-3]によれば、能登半島の構造物では、地下水の影響を受けるフーチングに亀甲状ひび割れや主鉄筋の破断が発見されており、橋梁下部工に著しいアルカリシリカ反応による劣化が見られる場合には通常の点検が難しいフーチングにも甚大なアルカリシリカ反応による劣化が発生している可能性があることが報告されている。

写真-4.1　石川県能登半島で発見されたフーチングの変状事例

写真-4.2　石川県能登半島で発見されたフーチングの鉄筋破断と内部ひび割れ

2007年の能登半島地震の復旧作業時に、アルカリシリカ反応が発生している橋梁下部工を掘削したところ、**写真-4.1**に示すようにフーチング上面に亀甲状のひび割れと、上面隅角部（側面の上部）に水平方向に大きな幅のひび割れが発見された。その部分を掘削したところ、**写真-4.2**に示すようにフーチング上面の隅角部において、上面側と側面側の折り曲げ部で鉄筋が破断しており、そこから内部に大きなひび割れが進行していることが確認された。日頃、目に触れる機会の少ないフーチングにおいても、建設年度や使用環境によってはアルカリシリカ反応が発生し、鉄

筋破断を伴う損傷に達している場合があることが明らかとなり、社会インフラの維持管理において対応が必要な課題である。この重大な課題に関しては、河野がアルカリシリカ反応の顕在化した道路橋のフーチングを対象として、暴露実験の実施により実環境に近い条件下でのアルカリシリカ反応の損傷メカニズムを明らかにするとともに、アルカリシリカ反応による損傷を受けたフーチングの耐荷性能と、その補修・補強方法を検討し、「アルカリ骨材反応による損傷が懸念される既設道路橋フーチングに対するメンテナンスに関するシナリオ」として発表している[4-4]。

また、道路橋下部工では、排水処理や水仕舞いに配慮がなされなかった事例が多いことから、T型単柱橋脚では、梁部分とくにその先端部で**写真-4.3、4.4** に示すようなアルカリシリカ反応による劣化が確認されている。

写真-4.3　T型橋脚の梁部分の ASR 劣化

写真-4.4　橋脚梁先端部の劣化事例

これまでの調査により、降雨や日射の影響を受ける橋脚梁端部や、地下水により水分の供給を受け続けるフーチング、河川、ダム等の水理施設では、コンクリート中にアルカリ金属イオンが存在する場合には長期間にわたってアルカリシリカ反応が継続し、コンクリートの膨張が継続することが知られている。膨張が継続することによりコンクリートの強度低下やヤング係数の低下をもたらすだけでなく、鉄筋破断という重大な損傷に繋がることが明らかになって来ている。2005 年に刊行された土木学会コンクリートライブラリーNo124「アルカリ骨材反応対策小委員会報告書-鉄筋破断と新たなる対応-」によれば、アルカリシリカ反応による劣化や鉄筋破断の発生しやすい環境として、アルカリシリカ反応による劣化が進みやすい日射、降雨の影響を受けやすい部位で、凍結防止剤として NaCl が散布されている使用環境があげられ、またその位置として**図-4.1** を示している。このような橋脚にお

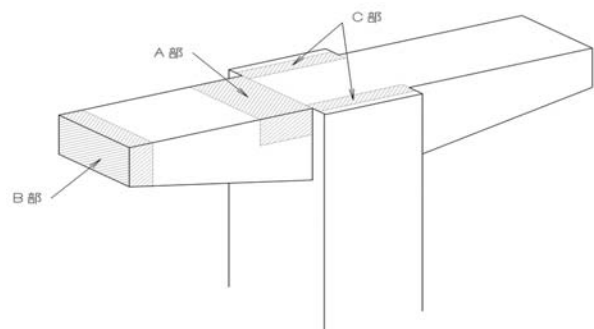
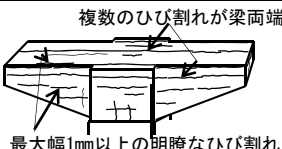
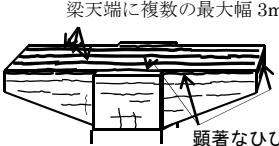



図-4.1　T型単柱橋脚でアルカリシリカ反応による劣化や鉄筋破断の生じやすい位置の例[4-2]

ける鉄筋破断箇所の特徴は、橋脚コンクリートがアルカリシリカ反応で膨張しようとした場合に、この膨張を拘束する鉄筋が少ない箇所で、その少ない拘束鉄筋の配置方向に対して直角に過大なひび割れが発生するところにあると述べている。

阪神高速道路公団は、アルカリシリカ反応に関する既往の研究成果や詳細調査によって得られた知見を整理して、2007 年に橋脚を対象とした本格的な鉄筋破断対応型マニュアルを策定した[4-5]。**表-4.1** は、アルカリシリカ反応により生じた幅１㎜前後のひび割れ発生とその進行段階を模式的に表したものである。阪神高速道路公団では、外観劣化度をひび割れの発生状況によってⅠ～Ⅳの４段階に区分し、幅１㎜以上のひび割れだけでなく、幅３㎜を超えるひび割れが発生する劣化度Ⅳになれば、鉄筋やＰＣ鋼材の健全度調査が必要であることを示し、合わせて橋脚の耐荷力についても検討することを維持管理フローの中で定めている。

表-4.1　アルカリシリカ反応を生じた橋脚の外観劣化度 [4-5]

（阪神高速道路公団　ASR 構造物の維持管理マニュアル　2007.2）

外観劣化度Ⅰ	
最大幅1mm未満のひび割れ	最大幅１㎜未満のひび割れが発生している。
外観劣化度Ⅱ	
最大幅1mm以上のひび割れが一部に発生	最大幅１㎜ 以上のひび割れが部分的に発生している。
外観劣化度Ⅲ	
複数のひび割れが梁両端まで連続している 最大幅1mm以上の明瞭なひび割れ	最大幅１㎜ 以上の明瞭なひび割れが梁天端、梁側面に発生し、複数のひび割れが梁両端部まで連続している。
外観劣化度Ⅳ	
梁天端に複数の最大幅 3mm 以上のひび割れ 顕著なひび割れ	最大幅 3㎜以上のひび割れが梁天端に複数発生し、凸形柱の天端や梁端部に顕著なひび割れが発生している。

アルカリシリカ反応による損傷が顕在化した道路橋の梁部分からブロック供試体を切り出して、表面ひび割れと鉄筋破断の関係を調査した結果を以下に示す。試体の切り出し位置は**図-4.2** に示すＡ（900×600×2500㎜）およびＢ（800×600×2500㎜）の２箇所である。

ブロック供試体の表面で観察されたひび割れは、大部分がかぶり位置まで留まっており、スターラップで囲まれた断面内にまではほとんど進展していなかった。また、ひび割れは表面から数センチの深さまではほぼ水平に進展しており、ほとんどが主鉄筋に向かって進展する傾向が認められ、一部、斜め上方や下方に向かうものもあった。これらのひび割れの幅は、表面から５㎝

程度の深さまでで急激に縮小している傾向が認められ、ほとんどがこの深さ位置では表面におけるひび割れ幅の50%以下に低下していた。

切り出したブロック２体を切断し、スターラップの曲げ加工部の破断状況をＡ供試体で２箇所、Ｂ供試体で１箇所確認した結果、鉄筋破断が認められた箇所において、破断部に最も近い表面部のひび割れ幅はＡ供試体で 2.5mm および 3.5mm であり、Ｂ供試体で 2.0mm であった。いずれも２mm を超える値であった。

図-4.2　　試験体切出し位置

鉄筋破断位置とひび割れ位置との関係を観察した結果、**写真-4.5** で示した部位ではほぼ一致しているが、**写真-4.6** で示した部位では７cm 程度、**写真-4.7** で示した部位では５cm 程度離れており、破断位置とひび割れ発生位置とは必ずしも正確に一致するのではなく、10cm 程度のズレは生じる可能性があることが確認された。言い換えれば、幅２mm 以上のひび割れが発生している場合には、そのひび割れ位置が図面上の曲げ加工部位置に厳密に一致していない場合であっても、曲げ加工部の鉄筋破断が表面ひび割れの原因となっている可能性があると考えられるため、鉄筋破断の発生を考慮した詳細調査計画を検討しておく必要がある。

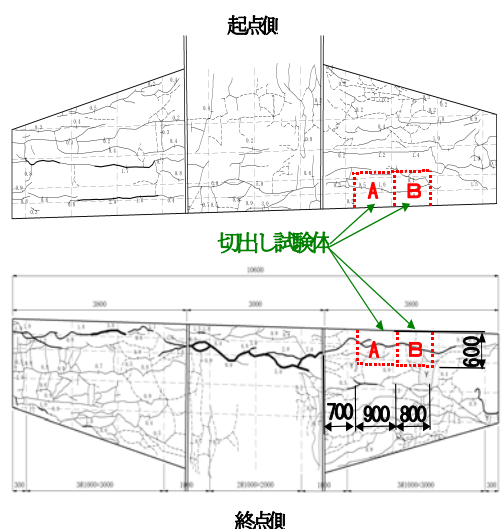



写真-4.5　Ａブロック起点側面：柱側の
表面および破面のひび割れ状況

写真-4.6　Ａブロック起点側面：先端側の
表面および破面のひび割れ状況

写真-4.7　Ｂブロック起点側面：柱側の
表面および破面のひび割れ状況

4.1.2　超音波斜角法によるコンクリート劣化調査

アルカリシリカ反応による劣化が著しく進行した場合には、コンクリート表面に一番近く配置された拘束鉄筋の曲げ加工部で破断が生じることが知られている。佐々木の研究によれば[4-6]、このような鉄筋破断メカニズムは、材料（ひずみ時効、節形状、曲げ半径、曲げ加工による加工硬化、破壊じん性値）、応力（曲げ加工によるひずみ、残留応力）、外力（アルカリシリカ反応による膨張力の影響）、環境（腐食に伴う水素ぜい化割れの可能性）の観点から、推定すべきと結論付けられている。

外観劣化や経年変化の特徴から、鉄筋破断が想定される構造物が抽出された場合には、鉄筋破断のメカニズムから曲げ加工部に着目して調査すればよいが、はつり調査を行う場合は、き裂は折り曲げ鉄筋の内側に存在するため確認作業には十分な注意が必要である。はつりによる鉄筋破断・き裂の検出は作業上の制約を受けやすいこと、構造物へ与えるダメージが懸念されること等を考慮すると、非破壊検査方法によるスクリーニングを行うことが有効である。このような場合の非破壊検査方法としては、超音波法や漏洩磁束法、電磁誘導法が採用されている例が多い。

このうち、超音波法は、鉄筋が曲げ加工部で破断した場合、拘束力が低下することによって、破断部からコンクリート内部にアルカリシリカ反応によるひび割れが進展しやすくなるという特徴を捉えるために、構造物隅角部周辺の超音波伝播特性を計測するものである[4-7]。

図-4.3　斜角法の概要

ここで示す斜角法は，顕著なひび割れが発生した構造物の隅角部において，**図-4.3** に表すように斜め方向に超音波を透過させ、ひび割れがかぶりコンクリートより深い位置まで進展しているかどうかを探ることによって表面からの劣化深さを推測するとともに、間接的に拘束筋曲げ加工部の破断の可能性を検出できる点検手法である。

帯鉄筋が破断した実橋脚の梁部で試行した斜角法の伝播波形を**図-4.4**～**図-4.6** に示す。これらはいずれも梁の上縁側隅角部において、**図-4.3** に示した要領で超音波探触子を配置して超音波を伝播させた結果である（c＋α＝50cm とした）。

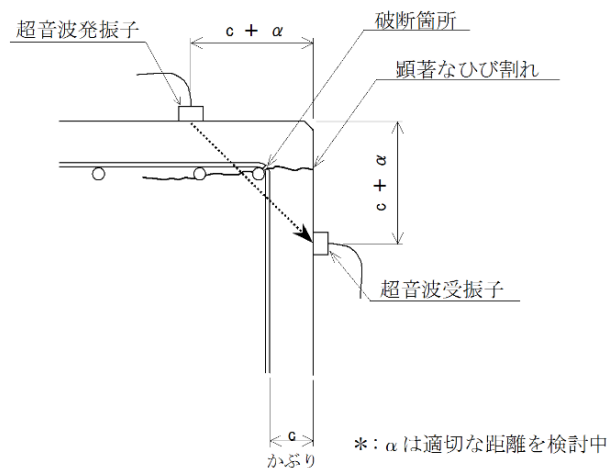



写真-4.8　斜角法測定状況

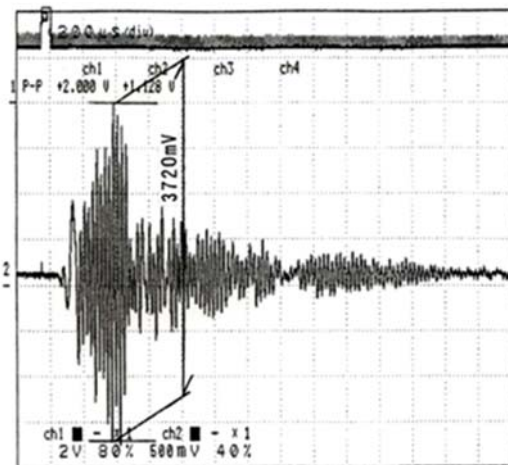



図-4.4　伝播波形（ひび割れなし）

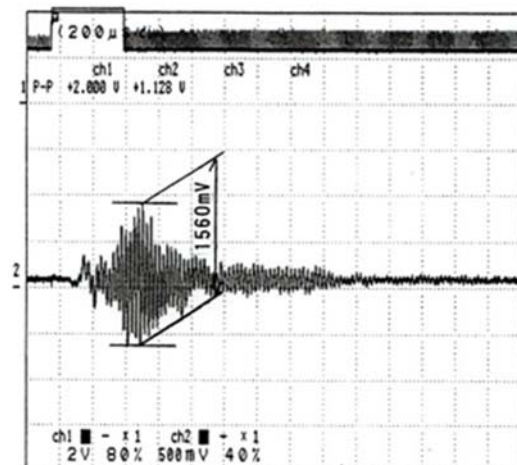



図-4.5　伝播波形（ひび割れあり）

図-4.4 はひび割れのない箇所、**図-4.5** は上縁付近に水平方向のひび割れが生じているものの、まだ帯鉄筋が破断していない箇所、**図-4.6** は上縁付近に顕著な水平ひび割れが発生しており帯鉄筋が破断している箇所である。ひび割れがない場合、伝播波形は非常に大きいが、ひび割れがある場合は小さくなる。また、鉄筋が破断している箇所の伝播波形は、ひび割れ発生だけのものと比べてもさらに小さなものとなる。このような特徴を定量的に評価できれば、鉄筋破断の生じている橋脚の選別が可能となる。

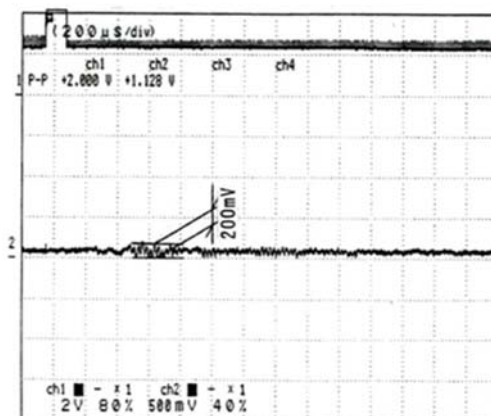



図-4.6　伝播波形（ひび割れ＋鉄筋破断）

またこの手法では、鉄筋とかぶりの界面に沿ってひび割れが進展している場合でも「鉄筋破断の可能性あり」と判定してしまう懸念が残るが、この場合は安全側の評価となるため、本手法を鉄筋破断箇所の選定手段として用いることは可能である。課題は何らかの原因でひび割れが目詰まりしている場合である。雨水と一緒に流入した泥等がひび割れ部で硬化してしまった場合、超音波がその部分を伝播するため、見かけ上内部にひび割れが進展していないような測定結果が得られ、判断を誤る恐れがある。後者の問題点の解決方法として、外観状況等の経年変化を踏まえた上での点検者の判断等と併用することが考えられる。

(1) 超音波装置の仕様検討

超音波装置はメーカーによって仕様（使用周波数帯、印加電圧等）が異なっている。コンクリートの非破壊調査に適する超音波装置を選定するため、コンクリート用として市販されている超音波装置を対象に比較試験を実施した。今回使用した超音波装置の仕様を表-4.2 に示す。

筆者らが主に使用している超音波装置（K 社製）は、印加電圧 1200V、放電時間 0.5μsec であ

る。探触子としては、共振周波数の異なる３種類（40kHz、80kHz、140kHz 探触子）を用意した。E 社製の装置に付属する探触子、ここで選定した探触子の中では共振周波数が最も低く 28KHz であった。Ｔ社製の超音波装置については、印加電圧が最も低い仕様であった。

用いた供試体の一覧を表-4.3 に示す。健全モデルは、普通コンクリートを用いて、設計基準強度を 35N/mm^2 として配合設計した。劣化モデルでは、ポーラスコンクリートの位置および量を変化させることで３段階の劣化状態を模擬した。

表-4.2　超音波装置の仕様

装置名	Ｋ社			Ｅ社	Ｔ社
印加電圧	1200V			1000V	700V
放電時間	0.5μsec			不明	0.5μsec
探触子 共振周波数 (※実測値)	40kHz (42.0kHz)	80kHz (77.1kHz)	140kHz (147.0kHz)	28kHz (28.3kHz)	50kHz (42.5kHz)
探触子直径	60mm	35mm	20mm	20mm	40mm

※実際に探触子同士を合わせて行った実測値

測定結果を図-4.7 に示す。健全モデルでは、装置や共振周波数に関わらず、伝播速度に大差はなかったのに対し、劣化モデルでは、劣化部の占める割合が大きくなるほど、装置や共振周波数によって伝播速度に差が生じた。小、中劣化モデルでは、Ｔ社の装置による伝播速度が遅い傾向にあった。Ｔ社は３種類の装置の中で最も印加電圧が低い。明石の研究 [4-8] によれば、発振パルスの振幅は、印加電圧に比例するため、電圧が低いと透過法の立上りが鈍くなり、伝播時間が遅く計測されるとしている。今回の計測結果においても、これらが起因して伝播速度に影響を与えたものと考えられる。全体劣化モデルでは、Ｋ社の装置で探触子が 140kHz の場合およびＥ社の装置による測定結果において、伝播速度が著しく低下した。これら二つの共通点は、探触子の直径がともに 20mm と小さいことにある。探触子との接触面もポーラスコンクリートであるため、表層は密着しにくい状態であった。探触子は面全体で発振・受振するため直径の小さい探触子では、その接触面の密着性による影響が生じ易いためと考えられる。

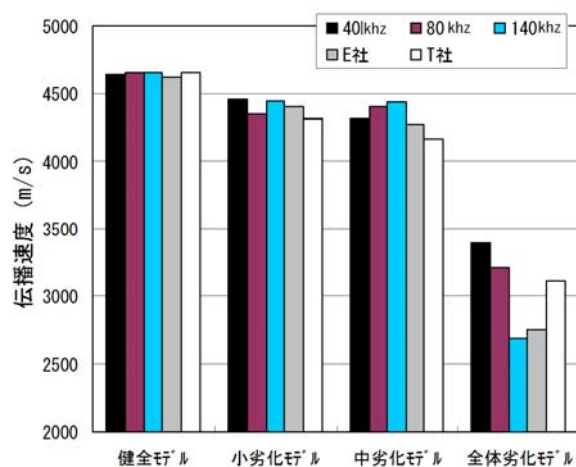



図-4.7　超音波伝播速度測定結果

表-4.3　供試体の仕

試験体	試験体概要	外　観
健全 ﾓﾃﾞﾙ	400 ﾉｰﾏﾙ Con	
小劣化 ﾓﾃﾞﾙ	400 ﾎﾟｰﾗｽ Con 100	
中劣化 ﾓﾃﾞﾙ	400 ﾎﾟｰﾗｽ Con 300	
全体劣化 ﾓﾃﾞﾙ	400 ﾎﾟｰﾗｽ Con	

※単位(mm)

超音波装置が異なれば同じ供試体でも伝播速度の測定値が異なるが、いずれの装置を用いた場合でも、劣化部の大小に応じた伝播速度の低下が確認されたことから、伝播速度に着目すれば、同一の装置を使用することにより、コンクリートの品質変化を判断することが可能であると考えられる。

(2) 斜角法を用いた表面からの劣化深さの検討

1) 斜角法の概要

梁断面で斜角法の測定を行う場合、図-4.8 に示すように、隅角部から受・発振用の探触子を同距離で順次遠ざけていき、超音波伝播時間を測定する。得られた測定データを、縦軸に伝播時間、横軸に探触子の中心間距離として整理すると、均質なコンクリートの場合、伝播時間は距離に比例することから走時曲線は直線で表される。一方、

図-4.8　斜角法による測定概要

コンクリート表面に劣化部やひび割れがある場合、伝播経路が表層劣化部と内部の一様なコンクリート部を透過するため、変曲点を持った走時曲線が得られることになり、伝播時間は距離に比例しない結果が得られる。斜角法はこの関係を利用

して劣化部やひび割れの有無を判断する調査方法である。

2) 探触子間距離の補正

超音波伝播速度測定においては、探触子間距離の設定方法によって見かけ上の伝播速度が異なることがある。これは、探触子としてある面積を持つ振動子を用いているにも関わらず、点発振・点受振と仮定し探触子の中心間距離を用いて伝播速度の算出を行っているためである。図-4.9 に示すように、斜角法では、中心間距離が短いほど伝播速度に与える影響は大きい。

図-4.9　探触子間距離の補正

そのため斜角法では、探触子間距離に対して一定の補正を行うことが必要となる。補正方法として、図-4.10 に示す実測した中心間距離と伝播時間から線形補間線を求め、線形補間線のX切片「d0」から探触子間距離を補正し、伝播速度を算出することを試みた。得られた線形補間線のX切片「d0」は、中心間距離と実際の探触子間距離の差、および表

層部と内部コンクリートとの品質から生じる伝播時間の変動量が含まれている。また、表層部が劣化したコンクリートの場合、補間する範囲で補正値が大きく影響を受ける恐れもあるため、可能な限り測定間隔の距離を短くすることにより、多くのデータを採取して補正値を適正なものにする必要がある。

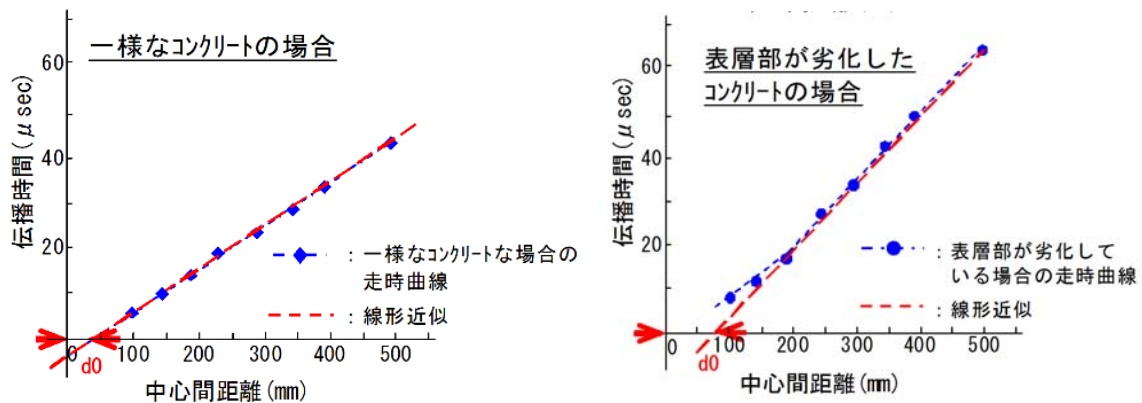



図-4.10　中心間距離と伝播時間の関係

3）内部劣化深さの算定

表層部が劣化した部材で測定した場合、探触子間距離を補正して伝播速度との関係を図示すれば、図-4.11 に示すような関係が得られ、

伝播速度が低下する箇所までを推定内部劣化深さと判断する。補正後の探触子間距離と伝播速度との関係から、図-4.11 に示す変曲点までの探触子間距離を Xo とすると、推定内部劣化深さ l は、式（4.1）により定まる。

$$l = \frac{1}{\sqrt{2}} \times Xo \qquad \text{-----}\ (4.1)$$

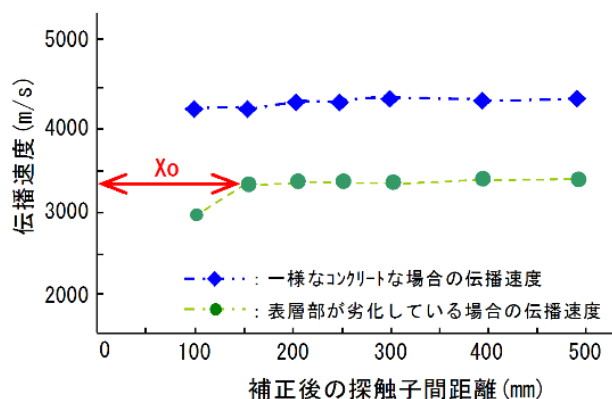



図-4.11　補正後の探触子間距離（mm）

（3）供試体を用いた斜角法の検討

1）供試体の概要

斜角法の適用性を検討するため供試体を用いた試験を行った。供試体は、健全なコンクリートとアルカリシリカ反応により劣化したコンクリートを用いた。健全なコンクリートは、40 年間の供用後、道路計画上撤去されることとなった都市高架道路のＲＣ橋脚梁部から切り出したブロック体である（以下、健全供試体と記す）。劣化は生じていない橋脚である。劣化したコンクリートは、反応性骨材を用いて作製した 600×600×600㎜ の角柱供試体を、40℃・100%RH の促進環境下

で約１年間促進養生させたものであり、試験時の表面ひずみは約 5000×10^{-6} であった（以下、ASR 供試体と記す)。反応性骨材の性質については、**表-4.4** に示した。

表-4.4　反応性骨材の概要

使用材料

材料種類	材料名
普通セメント	普通ポルトランドセメント
S1 川砂	兵庫県武庫川産下流産　砂(川砂)
S2 海砂	佐賀県唐津産　砂(海砂)
S3反応性細骨材	北海道産　砕砂
G1砕1505	箕面市止々呂美産　砕石
G2砕2015	箕面市止々呂美産　砕石
G3反応性粗骨材	北海道産　砕石

化学法による判定結果　（S3：砕砂）

アルカリ濃度減少量(Rc)　mmol/L	溶解シリカ量(Sc)　mmol/L	判定
103	435	無害でない

化学法による判定結果　（G3：砕石）

アルカリ濃度減少量(Rc)　mmol/L	溶解シリカ量(Sc)　mmol/L	判定
108	525	無害でない

JIS A 1145:2001　骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（化学法）

振側および受振側の探触子(共振周波数：40kHz 使用)を、隅角部から 100、150、200、300、400、500mm と同距離で順次遠ざけていき、常に探触子の傾斜角が 45°になるよう設置して伝播時間を測定した結果を**図-4.12** および**-4.13** に示す。**図-4.12** は、中心間距離を補正する前の探触子間距離と伝播時間の関係を示している。健全供試体の場合、中心間距離と伝播時間との関係はほぼ直線で近似されているのに対し、ASR 供試体の場合では、中心間距離 141mm(隅角部からの距離 100mm)の箇所で変曲点が生じている。4.1.2（2）2）で示した探触子間距離の補正を行った結果を、補正

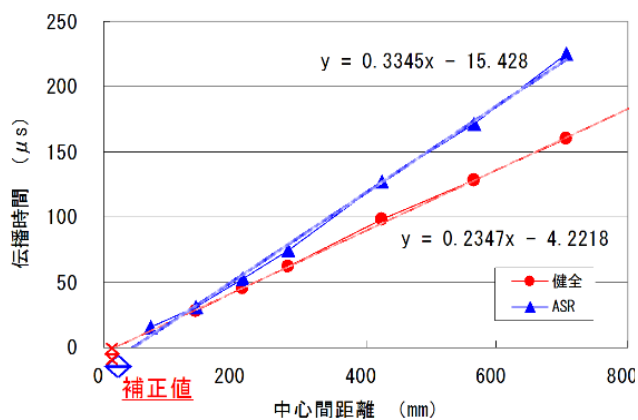
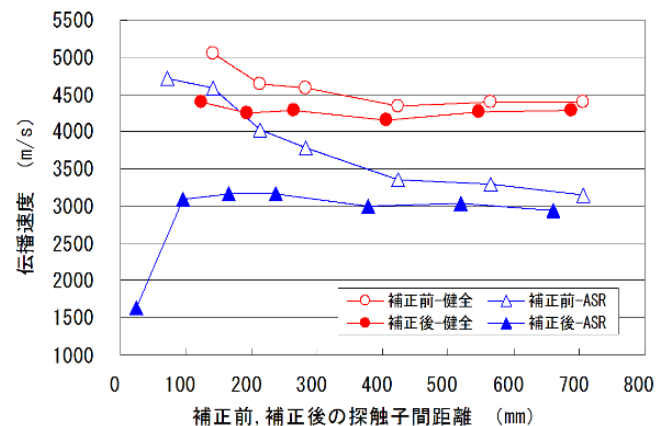



図-4.12　探触子中心間距離と伝播時間の関係　　**図-4.13　探触子間距離と伝播速度の関係**

前と合わせて**図-4.13** に示した。補正前の探触子間距離と伝播速度との関係では、健全供試体および ASR 供試体とも、探触子間距離が短いほど伝播速度は速い傾向を示している。健全供試体の場合、141mm(隅角部からの距離 100mm)の測点では 5000m/sec を超えており、コンクリートの伝播速度としては大きすぎる。明らかに見かけの伝播速度を示している。一方、補正後の伝播速度は、4400m/sec 程度でほぼ一定で推移しており、**図-4.12** に示したように中心間距離と伝播時間との関係が比例関係にあったことからも、補正方法が適切であったと考えられる。

2）表層部からの内部劣化深さの検証

ASR 供試体の場合、補正後の伝播速度は、**図-4.13** に示したように探触子間距離 91mm を境として伝播速度が著しく低下している。この値を**式（4.1）**に代入して内部劣化深さを求めると、64mm 程度であると推察された。

検証するためワイヤーソーを用いて ASR 供試体を切断してひび割れ状況の確認を行った結果の代表例を**写真-4.9** に示す。かぶり(100mm)までは細かなひび割れが認められており、顕著なひび割れが表面から 60mm 程度まで進展しているのが認められ、斜角法で推定した内部劣化深さとほぼ一致しているのが確認された。

写真-4.9　供試体の割断面

3）測定器および探触子による影響の検討

仕様の異なる超音波装置および探触子(共振周波数 80kHz、140kHz）を用いた場合、表層部からの内部劣化深さの評価に差が生じるか内部劣化深さの評価に差が生じるかどうかについて検討を行った。測定結果を**図-4.14** に示す。

探触子の共振周波数が高い 140kHz 時の測定では、ASR 供試体に対して探触子間距離 400mm 以上(隅角部からの距離 300mm 以上)の場合は超音波を伝播させることができなかった。斜角法では、対面で透過させる測定法と比べ、探触子が斜めに配置されているので、より大きなエネルギが必要となる。共振周波数が高い探触子ではエネルギが減衰しやすく、内部劣化深さの測定には適さないのではないかと考えられる。印加電圧の低いＴ社の装置では、健全供試体のみしか測定が行えなかったが、伝播速度の絶対値は低いものの、傾向は他の測定結果とほぼ同じであった。印加電圧は高い方が望ましいものの、仕様の異なる超音波装置を用いた場合においても、斜角法の適用は可能であると考えられる。

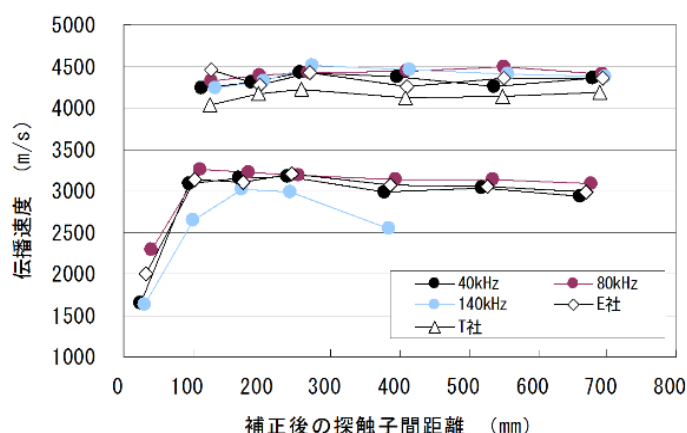



図-4.14　仕様の異なる超音波測定装置を用いた場合の補正後の探触子間距離と伝播速度の関係

（4）実構造物への斜角法の適用検討

１）実橋の概要

実構造物で対象として斜角法の適用性および精度等について検討を行った。対象とした構造物は外観上アルカリシリカ反応が顕在化しているＲＣ構造の道路橋脚２基で、劣化の進行が目視で

確認できるが、表面保護工等が施工されていない構造物である。ただし、部分的な断面修復は実施されている。両橋の外観状況および測定箇所を**表-4.5** に示す。M橋は、N橋と比較すると外観上のひび割れは軽微である。

表-4.5　対象構造物の概要

橋梁名称	外観状況	測定箇所
M橋	梁部分に幅 0.2〜0.3mm 程度のひび割れ	梁上側隅角部（天端） 梁端部隅角部（端面）
N橋	雨がかり部分に幅 0.5mm 以上のひび割れ、白色滲出物	梁上側隅角部（天端）、不陸あり 梁下側隅角部（梁下面）断面修復実施 梁端部隅角部（端面）

2）内部劣化深さの測定結果

測定は、隅角部から 100-100mm の位置から開始し、300-300mm までは 50mm 間隔、400、500mm は 100mm 間隔とした。斜角法の測定は、伝播距離が短いこともあり、特に浮きや大きなひび割れ、不陸が生じている箇所ではその影響を受けやすい。測定は、不陸の影響を無くすため、全ての測定位置でケレンを行ってから実施した。2橋で実測した結果を図-4.15 示す。N橋の天端および下面での測定結果では多数の変曲点が存在しており、伝播速度の低下位置を特定することは困難であるため除外し、端部の測定結果から内部劣化深さを推察した。M橋およびN橋の端部隅角部の伝播速度の低下位置から Xo を求め、**式（4.1）**に代入して得られた内部劣化深さは、M橋では 75mm 程度、N橋では 125mm 程度であった。

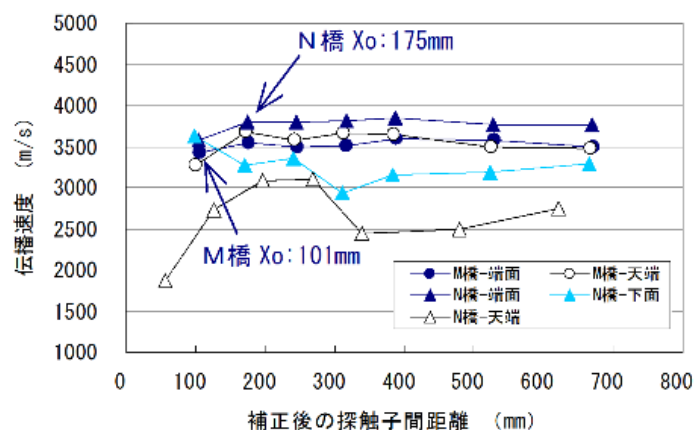



図-4.15　探触子間距離と伝播速度の関係

3）コア採取による内部劣化深さの検証

M橋およびN橋を対象に斜角法により求めた内部劣化深さの精度を検証するため、測定位置からコアを採取し、その外観を観察した。N橋でのコアのひび割れ状況を**写真-4.10** に示す。表面から 110mm 程度まで達する顕著なひび割れが観察された。また、N橋でのコアによるひび割れ深さの観察結果は 60mm であった。斜角法による推定値とコア採取によるひび割れ深さ実測値の関係を**図-4.16** に示す。斜角法による構造物の劣化深さ推定値は、実例値の 0.94〜1.14 倍の範囲内にあり、実用に耐え得る手法であることが確認できた。

写真-4.10　採取コアのひび割れ状況

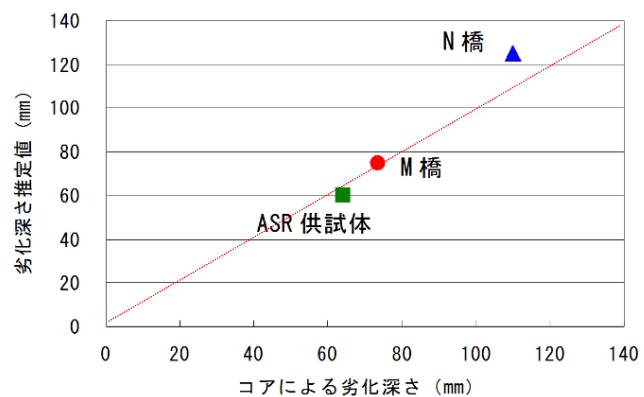



図-4.16　劣化深さ推定値と実測値との関係

(5) まとめ

1) 斜角法により表層部が劣化した部材で伝播速度の測定を行い、探触子間距離を補正して伝播速度との関係を図示することにより、内部劣化深さの推定が可能である。

2) 供試体および実構造物で斜角法により内部劣化深さを推定した結果は、コア採取あるいは部材切断により求めた劣化深さの実測値と良く一致した。

3) 斜角法による測定は探触子が斜めに配置されるため、対面で透過させる測定法に比べ、より大きなエネルギが必要となる。超音波装置および探触子を選定する際には留意が必要である。

4.2　トモグラフィ法によるコンクリート構造物内部の劣化調査

4.2.1　供試体を用いたトモグラフィ法の検討

アルカリシリカ反応によって劣化した構造物の非破壊検査手法として超音波法を取り上げて検討を行った。超音波法は、ひび割れ注入やコンクリート表面塗装による補修が実施された箇所でも測定が可能であること、測定された伝播速度とコンクリート強度や静弾性係数との間に比例関係が認められること等から、アルカリシリカ反応による損傷を受けた構造物内部の劣化の進行を評価できる可能性を持つ方法である。しかし、これまでの測定結果からは、発振側の探触子と受振側の探触子を結ぶ超音波伝播経路になんらかの大きな変化があれば超音波速度の変化として把握できるものの、構造物を透過させた速度の大小から劣化の進行程度を正確に評価することは難しいのが現状である。また、構造物表面に生じているアルカリシリカ反応によるひび割れの深さあるいは内部で進行している微小なひび割れの影響等を加味したうえで、コンクリート構造物内部の劣化進行状況を十分な精度を持って把握するレベルに達していないとの報告もある[4-9]。

本論文では、弾性波法の一種である超音波法を用いた超音波トモグラフィ法[4-10]を用いて、アルカリシリカ反応による劣化が顕在化したコンクリート構造物内部のコンクリート品質の劣化状態を評価することを目的として研究を進めた。

トモグラフィ技術を応用した解析手法は、主に大きく２つの解析手法から構成される。１つは順解析(弾性波トモグラフィでは、波線追跡計算：RayTracing-レイトレーシング)と呼ばれるもの

であり、発振点から受振点に至る弾性波の伝播経路を再現し、その到達時間を計算によって算出するものである。

もう１つは、逆解析(Inversion-インバージョン)と呼ぶもので、計算にて求められた伝播時間と測定された伝播時間との差(残差)を小さくするように、弾性波伝播速度を修正し、最適な速度を算出していく解析手法である。

本論文では、順解析として「逆投影法」、逆解析に「同時反復再構成法」を用いて検討を行った。予備試験として100×200×1600mmの梁供試体を用いて、アルカリシリカ反応の初期の進行を超音波トモグラフィ解析方法で表現できるかを検証した後、長期暴露試験供試体を用いて、超音波トモグラフィの有効性を検討するとともに、アルカリシリカ反応が進行している実橋脚と健全な橋脚において超音波トモグラフィ法の有効性を実証した。

(1) 予備実験

予備試験に用いた供試体は反応性骨材コンクリートを用いたＲＣ部材（**写真-4.11** 参照、100×200×1600mm）である。計測は、初期状態（促進養生後１ヶ月）およびアルカリシリカ反応による劣化が進行したことが確認された促進養生後12ヶ月に実施した。

写真-4.11　予備試験供試体全体

写真-4.12　予備試験供試体側面

写真-4.13　測定状況（波形収録）

写真-4.14　測定状況（探触子設置）

1）測定手法と測定装置

表-4.5　超音波装置の仕様

超音波発生装置	USO	
印加電圧	1200V	
放電時間	0.5μsec	
探触子 共振周波数(※実測値)	80kHz (75.1kHz)	140kHz (140.4kHz)
探触子直径	35mm	20mm

※実際に探触子同士を合わせて行った実測値

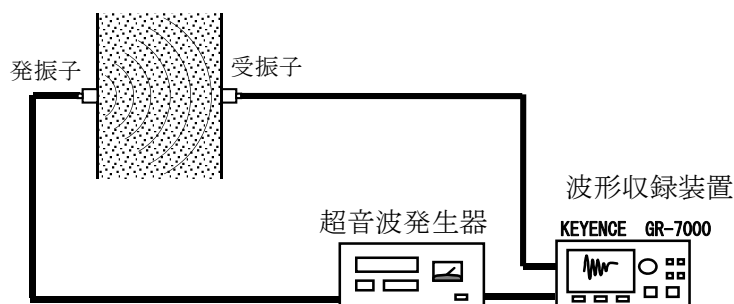



図-4.17　超音波測定システム図

【機器構成】

・波形収録装置：マルチレコーダー　GR-7000　(KEYENCE 製)

・超音波発生装置：弊社オリジナル　(印加電圧：1200V、放電時間：0.5×10^{-6}sec)

・探触子：共振周波数　80kHz 140kHz［弊社オリジナル］

2）トモグラフィ解析方法

①逆投影法

計測断面を**図-4.18** に示すように、水平・鉛直方向に等分割しブロック分けを行い、各ブロック内を通過する各測点の透過ラインの距離を算出する。次に、弾性波がブロックを通過する長さで重み付け、速度の重み付き平均値を求める。各波線がブロックを通過する長さで重み付けをすると j 番目のブロックの求める速度 Vj は**式（4.2）**となる。

$$V_j = \frac{\sum (l_{ij} V_i)}{\sum l_{ij}} \quad \text{-----} \quad (4.2)$$

l_{ij}：i 番目の波線が j 番目のブロックを通過する長さ

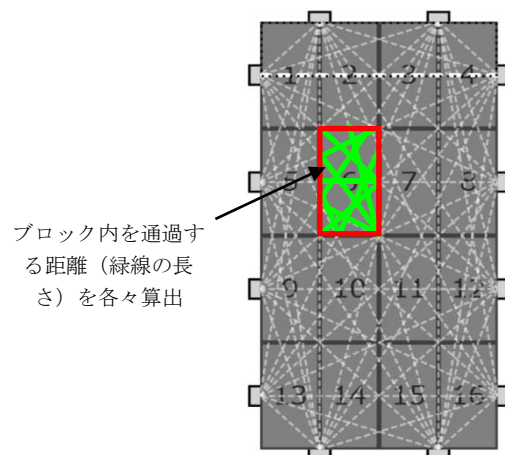



図-4.18　ブロック割の例
（水平 4、鉛直 4 分割）

②同時反復再構成法（SIRT：Simultaneous Iterative Reconstruction Technique)

超音波測定結果の伝播速度と逆投影法で算出した各ブロックの伝播速度の誤差を補正するため、SIRT 法を使用した。SIRT 法はマトリクス計算を行わず、残差や各セルを透過する波線の長さより直接、伝播時間の修正量を求める手法である。伝播時間の修正量ΔS は下式にて記述される。

$$\begin{bmatrix} \Delta S_1 \\ \cdots \\ \Delta S_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{m} (l_{i1} OS_i) / \sum_{i=1}^{m} (l_{i1}) \\ \cdots \\ \sum_{i=1}^{m} (l_{in} OS_i) / \sum_{i=1}^{m} (l_{in}) \end{bmatrix} \quad \text{-----} \quad (4.3)$$

OSi ： i 番目の波線の残差を全波線長で割ったもの
m ：ブロック内を通過する測点数

3）測定結果（トモグラフィ解析結果）

供試体番号 A0 の促進養生１ヶ月後と 12 ヶ月後のトモグラフィ解析画像を**図-4.19** に示す。供試体の端面から 450㎜ 内側の断面を表した画像である。同図の左端の列は探触子 80kHz、左から２列目は 140kHz での測定結果で、いずれも材令１ヶ月である。さらに左端から３列目は探触子 80kHz、左端から４列目（右端）は 140kHz のいずれも材令１年での測定結果である。

また同図の１行目（上段)、２行目（中段)、３行目（下段）は同時反復再構成法の繰り返し回数が 0 回、10 回、100 回の計算結果を示したものである。

解析条件として、梁供試体の断面を、ブロック分割数水平方向 4 分割、鉛直方向 8 分割とした。また、伝播速度による速度差を色分けし、4500m/sec を最大値（青色)、3500m/sec を最小値（赤色）とし、25 水準で分類することとした。

促進養生後１ヶ月程度で実施した超音波計測では、概ねコンクリートの状態としては、「健全」な状態での計測であったと想定されたが、トモグラフィ解析の結果では、伝播速度に多少のばらつきが既に認められた。同一材令における断面内の伝播速度の分布は、周波数の高い（140kHz）探触子を使用した方がばらつきが多い傾向を示している。これは、波長の短い探触子の方がアルカリシリカ反応により生じた微細なひび割れの影響を受けやすいためと考えられる。

促進養生後 12 ヶ月で実施した超音波計測では、１ヶ月後の計測時から全体的に伝播速度が低下している様子が確認できる。12 ヶ月の促進養生においても、周波数の高い探触子の方が変化に対する感度が高いものと判断される。

4）結果と現状の課題

１ヶ月目の超音波計測値は初期値として健全な状態での計測であったが、トモグラフィ解析の結果では既に伝播速度に多少のばらつきがみられ、特に隅角部では顕著である。これは、隅角部のブロックを通過する測線が他のブロックに比べて少ないために、全体に伝播速度が小さく表現されることが原因と考えられる。

12 ヶ月目の超音波計測値は、１ヶ月目の計測と比較して全体的に伝播速度が低下しており、アルカリシリカ反応による劣化の進行が影響したものと考えられる。ただし、各供試体あるいは各断面でトモグラフィ解析結果に卓越した傾向は認められない。

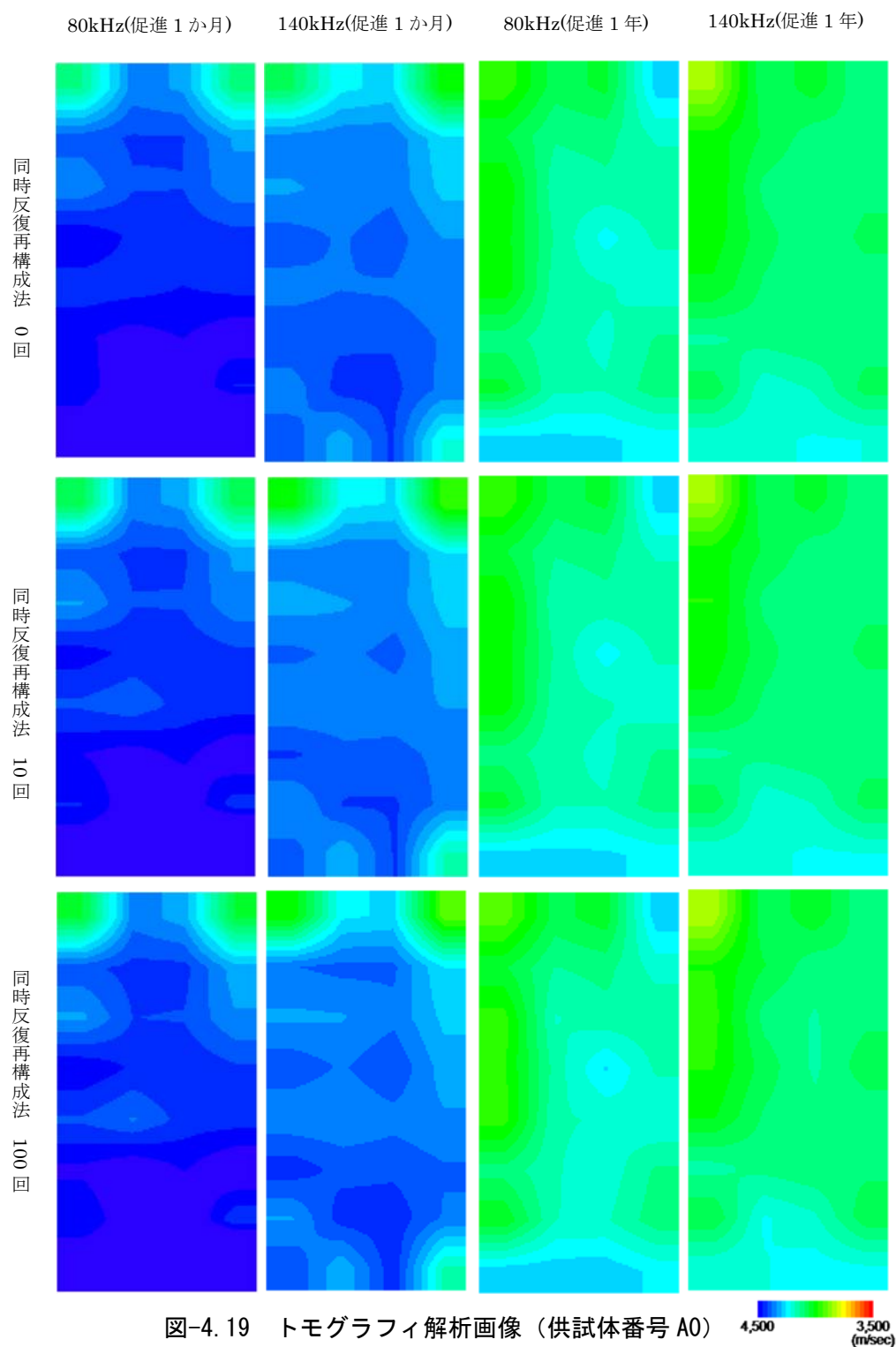



図-4.19　トモグラフィ解析画像（供試体番号 A0）

【探触子】

2 種類の探触子では、共振周波数 140kHz を使用した方が、ばらつきが大きい結果となった。原因として、探触子の形状(大小)による影響も考えられるが、伝播経路の違い(水平方向および斜角方向)による影響が大きいと考えられ、特に高周波であるほど減衰等の影響を受けやすいことを繁

栄した結果であると考えられる。

【供試体形状】

供試体の断面が小さいため、特に伝播経路の違い(水平方向および斜角方向)による差、各ブロックを通過する法線数が少なく、伝播速度の重み付けの平均値そのものがばらついて差が過大となっていると考えられる。たとえば、探触子間が短い場合には、探触子の端部での発振・受振となるのか、あるいは探触子の中心での発・受振となるのかにより、超音波の伝播距離が微妙に異なるため、伝播距離による補正を行って伝播速度を算出する必要がある可能性もある。

【同時反復再構成法(SIRT 法)の解析処理数】

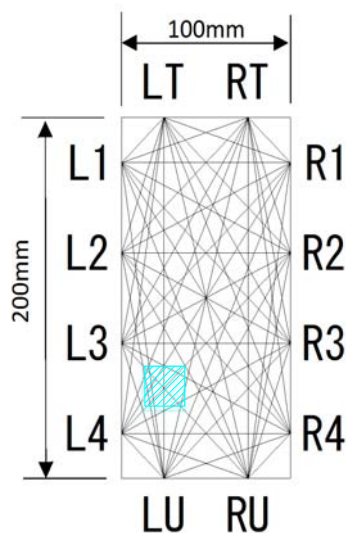
・SIRT 法の解析処理数を増やすことで劣化部の伝播速度の変化が顕著になったが、他の部分に与える影響も強くなり、劣化していない部分においても伝播速度が遅くなる傾向が見られた。
・セルの分割数を増やすことで、劣化位置がより明瞭に示される。しかし、セル内を通る波線の本数が少ないため、SIRT 法の影響により劣化部以外の箇所も擬似的に影響を受ける。
・劣化部については 3500m/sec を設定したが、実際に表示されている画像ではセル分割数 32 で 3900m/sec、128 で 3700～3800m/sec 程度の速度を示しており、幾分誤差が生じている。

これらは解析手法から生じる現象であり、セルの分割数を増やす(測点を増やす)ことである程度の改善は見込めると考えられるが、供試体の形状と探触子の形状の関係もあり、分割数が多いほど正確になるとは判断できない場合もある。

5) 同時反復再構成法(SIRT 法)の検証

トモグラフィ法と同時反復再構成法(SIRT 法)の有効性について検証を行なうため、大きさ 100×200㎜の供試体に**図-4.20**に示すように 25×25㎜の模擬欠陥を設けて測定を行った。

供試体のセルの分割数と、同時反復再構成法の繰り返し回数のパターンを**表-4.7**に示す。

出力した結果については**図-4.21**～**図-4.26**に示しているが、セルの分割数は 32 よりは 128m の方が欠陥の検出精度が向上するものの、繰り返し回数は 1000 回よりも 100 回であっても精度向上

：欠陥部（伝播速度 3500m/s）と仮定（25㎜×25㎜）

その他：健全部（伝播速度 4000m/s）と仮定

図-4.20　供試体における劣化部の設定概要

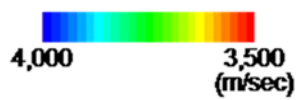
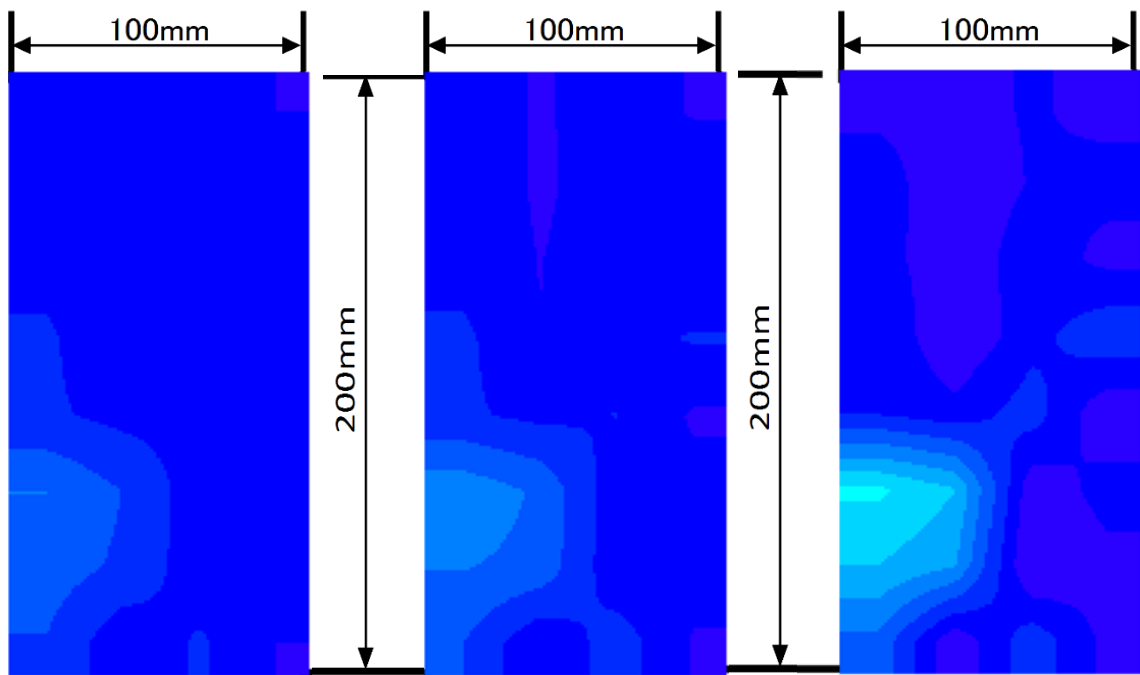
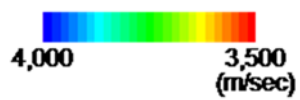
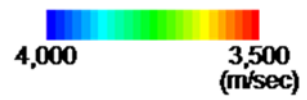
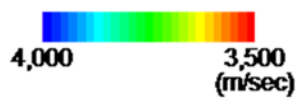
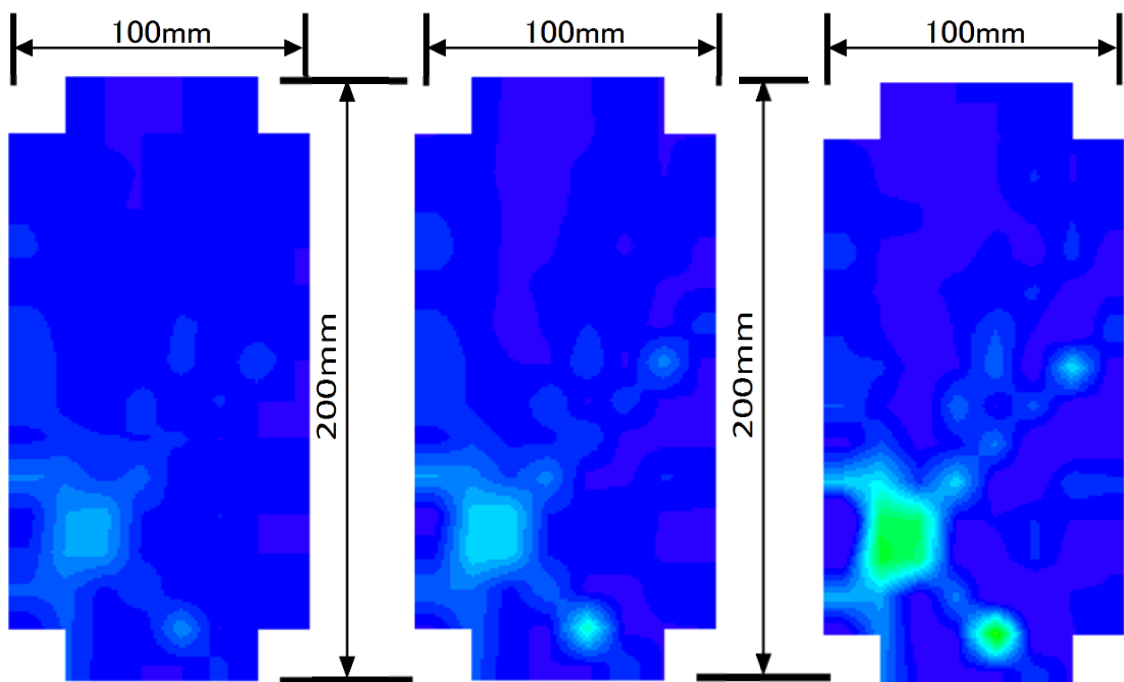
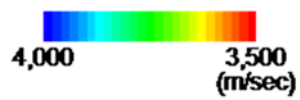
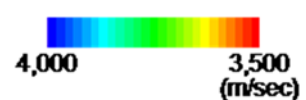
にはそれほど効果的とはなっていないようである。

図−4. 21 ﾊﾟﾀｰﾝ 32−0　図−4. 22 ﾊﾟﾀｰﾝ 32−100　図−4. 23 ﾊﾟﾀｰﾝ 32−1000

図−4. 24 ﾊﾟﾀｰﾝ 128−0　図−4. 25 ﾊﾟﾀｰﾝ 128−100　図−4. 26 ﾊﾟﾀｰﾝ 128−1000

表-4.7　出力画像のパターン

パターン	セルの分割数 (水平方向×鉛直方向)	同時反復再構成法 繰り返し回数
32-0	32(4×8)	0
32-100		100
32-1000		100
128-0	128(8×16)	0
128-100		100
128-1000		1000

(2) 長期暴露 ASR 試験供試体

4.2.1 (1) の予備試験では、アルカリシリカ反応性骨材を用いた小型供試体で超音波トモグラフィを適用すると、促進養生期間 12 ヶ月における断面内のコンクリート品質のばらつきを評価できることを確認できた。本節ではアルカリシリカ反応がさらに進行した場合での適用性を検証するため暴露期間 7 年を経た供試体を用いて検討を行った [4-11]

1) 試験概要

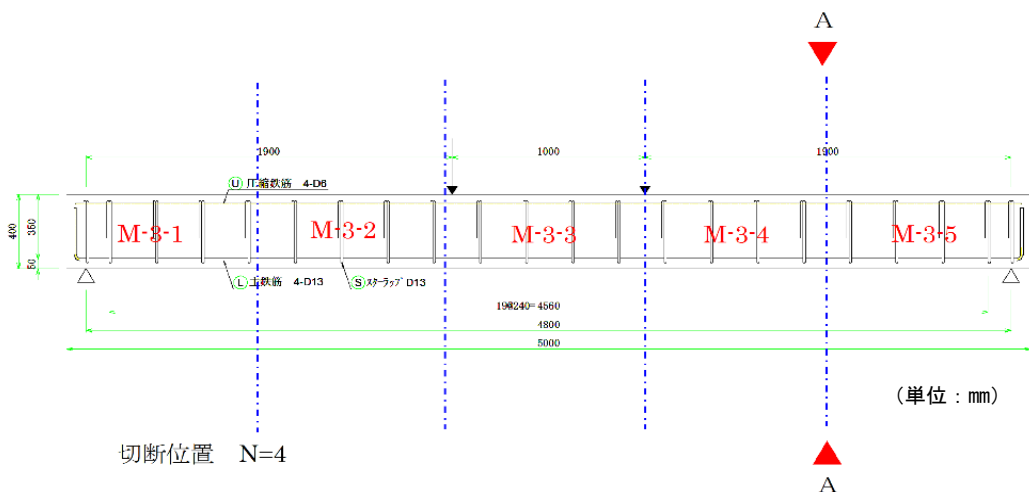
ASR 試験体としては、4.1.2 (3) 1)の表-4.4 に示したアルカリシリカ反応性骨材を用いて 2007 年に打設、屋外にて 6 年間長期暴露された方式のＲＣ試験体を用いた。これまでの表面ひずみのモニタリング計測の結果では、8000～9000μ 程度膨張していることが確認されている。試験体の大きさは 400×400×5000mm で、**図-4.27** の▲印で示したスパン中央から離れた断面で超音波トモグラフィによる計測を実施した。

Ａ－Ａ断面：トモグラフィー試験および反発硬度測定断面

図-4.27　試験体の概要

2）測定

各試験体の部材断面における超音波探触子の設置・測定間隔は 90mm を基本とし、発振側および受振側探触子の２個のみを使用して、**図-4.28** に示す探触子設置位置で順次探触子を動かしていき、超音波を対面方向(透過方向)、斜角方向および表面波のデータを収集した。

表-4.8 に今回使用した超音波装置の仕様を示す。今回使用した超音波装置は、印加電圧 1200V、放電時間 0.5μsec である。探触子としては共振周波数 40kHz のものを使用した。

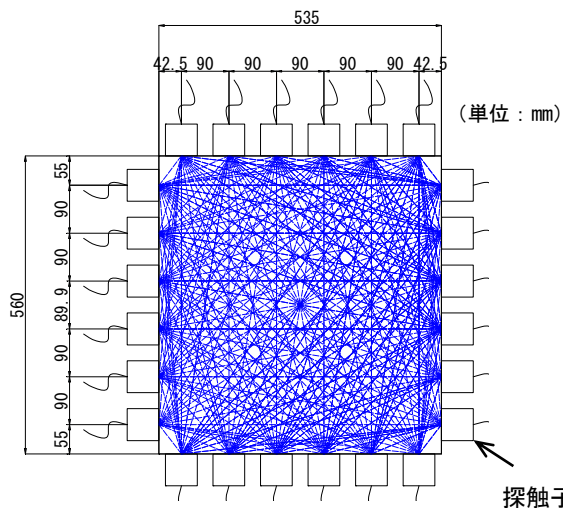



図-4.28　中型試験体の超音波探触子設置位置図

表-4.8　超音波装置の仕様

装置	K 社製
印加電圧	1200V
放電時間	0.5μsec
探触子共振周波数 (※実測値)	40khz (42.0khz)
探触子直径	60mm

※実際に探触子同士を合わせて行った実測値

3）トモグラフィ解析方法

トモグラフィ技術を応用した解析手法として、先の予備測定と同様に、順解析として「逆投影法」、逆解析に「同時反復再構成法」を用いて検討を行った。

4）伝播速度による評価

「健全試験体」と「ASR 試験体」の伝播速度を評価パラメータとしたトモグラフィ解析結果を**図-4.29** に示す。解析条件として先ず試験体の断面を、**図-4.28** で示したように水平方向６分割、鉛直方向６分割にブロック分割した。また、伝播速度による速度差を 4200m/sec を最大値、3500m/sec を最小値として 25 水準で分類、色分けを行った。

健全試験体の解析結果では概ね 4500～4600m/sec 程度、ASR 試験体の解析結果では 3400～3600m/sec 程度で、健全試験体と比較して伝播速度の低下が明確に認められた。しかし、ASR の劣化現象は、特に環境条件の影響を受けるコンクリート表層側で最も大きく、徐々に内部側へ劣化が進展していくメカニズムが通常である。

ASR 試験体の断面内での伝播速度分布は、表層部の方が内部に比べ伝播速度の低下が顕著に現れるはずである。しかし当該試験体を対象とした解析結果では、ASR 試験体において伝播速度が顕著に低下した傾向は認められたものの、断面内では一様な伝播速度分布を示した。

これらトモグラフィ解析の結果を検証するため、試験体をワイヤーソーで切断し、そこから鉛

直方向および軸方向からコアを採取し、物性試験を実施した。採取コアの圧縮強度および静弾性係数試験の結果を**表-4.9**に示す。

軸方向および鉛直方向の圧縮強度を比較すると、健全試験体の場合では軸方向の方が鉛直方向のコアに比べ３％程度、ASR 試験体では 24%程度強度が高くなる傾向を示した。静弾性係数試験においても同様に、鉛直方向のコアより軸方向で採取したコアの方が高くなる傾向にあった。これは、アルカリシリカ反応による膨張を軸方向鉄筋等が拘束したために、軸方向の圧縮強度や静弾性係数が大きくなったことも影響していると考えられる。言いかえれば、健全試験体は表層側および内部側ともコンクリートの状態は同程度であるのに対し、ASR 試験体の場合では内部側よりも表層側の方が、よりコンクリートの膨張による劣化が顕著に進展していることが確認できた。

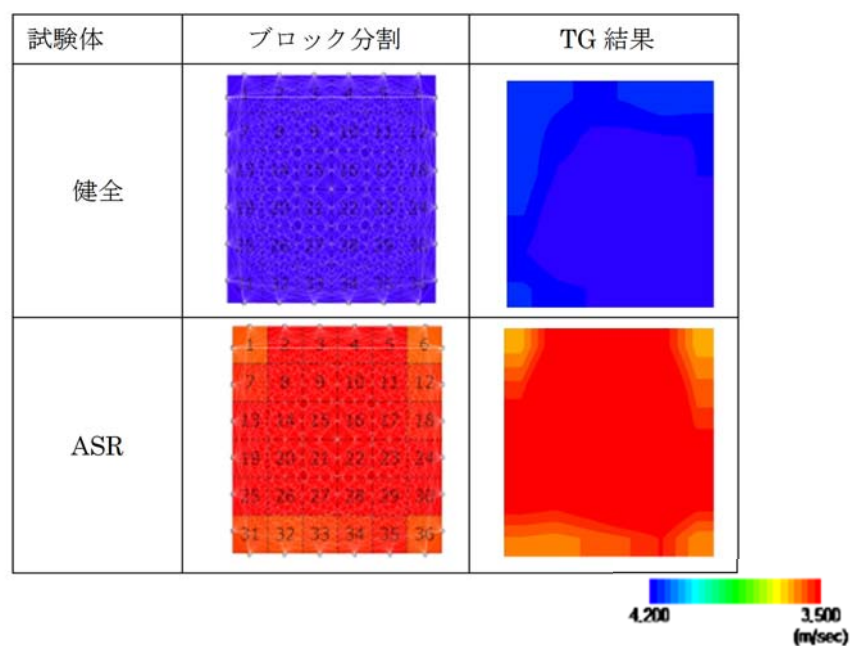



図-4.29　伝播速度のトモグラフィ結果

表-4.9　中型供試体物性試験結果

試験体	コア採取方向	圧縮強度（N/mm²）		静弾性係数（kN/mm²）	
		測定値	平均	測定値	平均
健全	軸方向	43.8～69.3	68.6	38.5～39.2	38.9
	鉛直方向	55.1～72.9	66.7	35.5～38.4	36.5
ＡＳＲ	軸方向	37.5～46.1	42.7	19.4～20.7	20.1
	鉛直方向	35.7～42.2	32.6	6.87～10.1	8.67

図-4.29 に示すように、従来の伝播速度をパラメータとした評価方法では、アルカリシリカ反応により劣化した試験体をトモグラフィ法により可視化しても、**表-4.9** に示された表層側の方が

内部側よりも劣化進行が早いというような力学的特性傾向を適切に表現することはできなかった。

5）評価指標の改良

トモグラフィ解析の精度を上げるため、指標となる評価のパラメータの検討を行った。既往のトモグラフィ解析では伝播速度を評価パラメータとすることが一般的である。しかし、伝播速度は健全試験体および ASR 試験体とも、各試験体での速度差はほとんど生じていない。そのため、伝播速度をパラメータとした解析結果では、伝播速度分布が一様に表現されたと考えられる。

伝播波形を周波数分析し、スペクトル重心を評価パラメータとした検討を試みた。これは弾性波エネルギに着眼した分析手法であり、超音波法では、透過した弾性波の高周波成分の減衰を定量的に示したものと言える。ここで示すスペクトル重心とは、伝播波形を解析して得られた周波数スペクトルの重み付けをした平均値である。既往の研究によれば、スペクトル重心や最大振幅等、弾性波エネルギに着眼した評価パラメータの方が、アルカリシリカ反応により劣化した構造物では伝播速度よりも伝播媒体の影響を感度良く捉えられることが報告されている。

スペクトル重心の概要を**図-4.30** に示す。

$$\text{スペクトル重心(kHz)} = \frac{\Sigma Ei \cdot Fi}{\Sigma Ei} \quad \text{-----(4.4)}$$

ここに、Ei: 成分の大きさ、Fi: 周波数

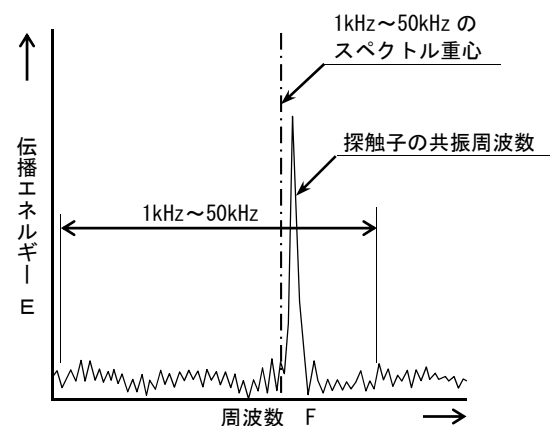



図-4.30 スペクトル重心の概要図

6）スペクトル重心による評価

中型試験体におけるスペクトル重心を評価パラメータとしたトモグラフィ解析結果を、**表-4.11** に示す。アルカリシリカ反応の初期の段階では、アルカリシリカゲルの吸水膨張によって骨材界面のマイクロクラックが発達し、これが成長するとマトリックス部分にも微細なひび割れや細孔構造の変化を引き起こすと考えられている。このような微細なコンクリート構造の変化は超音波伝播波形の周波数に影響することから、周波数の変化に着目する方がよいと判断した。なお、スペクトル重心を指標とした場合、逆投影法でモデルを作成する際に伝播速度におけるスローネス（速度の逆数）と同様に距離情報を有した特性値を必要とするため、周波数に伝播距離を乗じて逆数とした値を使用した。スローネスとは伝播速度の逆数をいい、スローネスの増加は損傷度の増加と比例している。また、健全試験体ではスペクトル重心 35kHz を最大値、20kHz を最小値として 25 水準で色分けした。ASR 試験体については表層側と内部側とのコンターの濃淡を明確にするためレンジは可変した。

ASR 試験体ではコンクリート表層側の周波数が内部より低下した傾向を示しており、ワイヤーソーによる切断面の変状と同様な劣化機構を可視化することができた。一方、健全試験体では、

コンクリート内部の中心位置付近で、一部周波数が低下するのが認められた。

表-4.10　ブロック分割数の変更

改良前 分割数(6×6)	改良後 分割数(18×18)

※中型試験体の場合

表-4.11　スペクトル重心のトモグラフィ結果

評価 ﾊﾟﾗﾒｰﾀ	健全試験体	ASR 試験体
ｽﾍﾟｸﾄﾙ 重心		

※中型試験体の S1 断面の結果

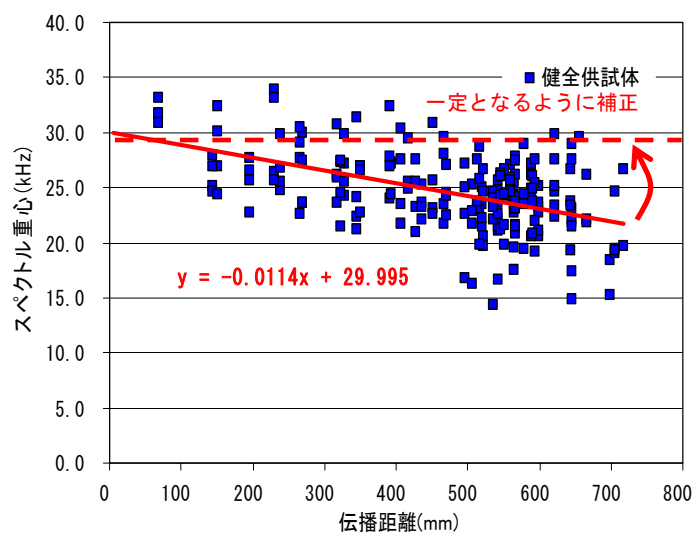
7）距離減衰の影響を考慮した評価

評価パラメータ、および解析のブロック分割数を改良・修正したことによって、従来の伝播速度を基にしたトモグラフィ解析より、実試験体の劣化状態と似かよった解析結果が得られた。しかし、**表-4.9** の圧縮強度および静弾性係数試験の測定結果を反映すると、健全試験体では表層側と内部側のコンクリートの強度は同程度であり、**表-4.11** で示した健全試験体のコンクリート内部の中心位置付近で、一部周波数が低下した傾向を示したトモグラフィ解析結果とは整合しない。

高田、塩谷らの研究 [4-9] によれば、伝播速度や振幅等の弾性波パラメータは、伝播距離による影響が考慮されておらず、直接的に劣化の指標に結び付けることが困難であるとしている。つまり、弾性波パラメータを劣化と結び付けるには、伝播距離による補正（距離減衰を考慮）が必要であることを示唆している。中型健全試験体の伝播距離とスペクトル重心の関係を**図-4.31** に示す。

スペクトル重心は、当該試験体では伝播距離に応じて線形に低下する傾向を示している。そこで、健全試験体のコンクリートの表層側と内部側が一様なコンクリート状態と仮定し、算出した線形回帰式が図中の波線部で示す一定値になるよう伝播距離による補正を行った。

図-4.31　スペクトル重心と伝播距離の関係

トモグラフィ解析は、35kHz を最大値、20kHz を最小値として 25 水準で色分けした。

距離減衰による補正の結果、ASR 試験体では距離減衰補正前と比較して、表層側の周波数が内部と比べて低い傾向は変わらないものの、局部的な周波数の差は生じることなく、周波数の高低差が明瞭に現れている。

また、載荷試験前後を比較すると、載荷試験後の方が残留変形が大きく、その影響で微細クラックが増加したために全体的に周波数が低下する傾向を示した。

供試体の切断面で実施した反発硬度は**図-4.32** のような分布を示していた。また切断面の外観状況およびトモグラフィ解析結果を**図-4.33、4.34** に示す。

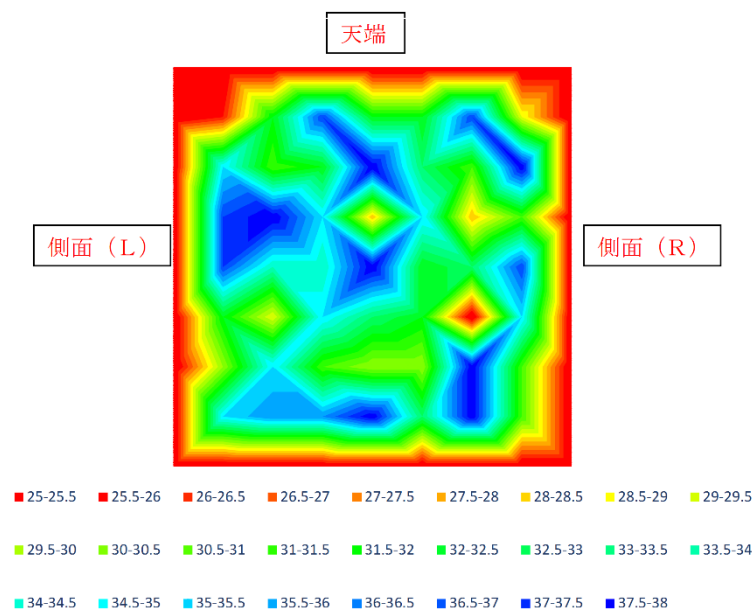



図-4.32　反発硬度の分布図

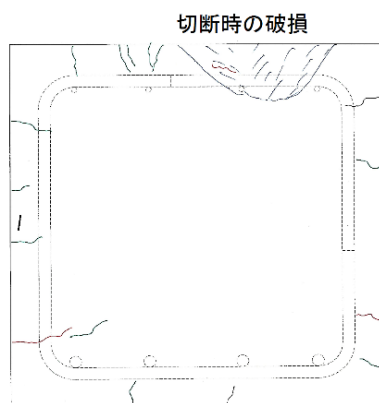



図-4.33　切断面の外観状況

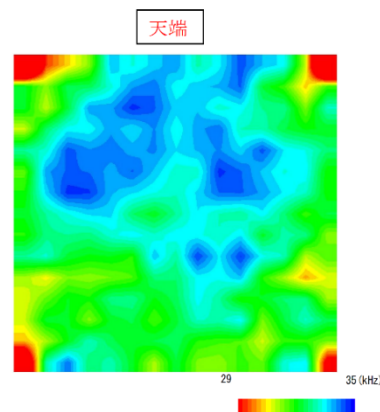



図-4.34　切断面のトモグラフィ解析結果

トモグラフィ解析で適用した各分割ブロックにおけるスペクトル重心を**図-4.35** に、各ブロックにおける反発硬度を**図-4.36** に示す。ここで、**図-4.36** に示した反発硬度は、スペクトル重心のブロック分割数に一致させている。新たに分割したブロックの反発硬度は、隣接する実測値を元に内挿して振り分けて表示している。

また、**図-4.35** のスペクトル重心も、反発硬度の表示に整合させることから、最外縁のブロックにおける数値は表示していない。

0	27	53	80	107	133	160	187	213	240	267	293	320	347	373	400
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	-	31	32	32	33	34	34	33	34	34	34	32	31	30	-
80	-	31	32	34	34	35	34	33	34	33	33	33	33	31	-
107	-	32	33	33	34	33	34	33	34	34	33	33	32	32	-
133	-	33	34	34	34	34	34	33	34	34	33	34	33	33	-
160	-	34	34	34	34	34	34	33	33	35	34	34	33	33	-
187	-	33	35	34	34	33	33	33	33	34	34	34	33	33	-
213	-	33	33	33	33	32	32	33	33	33	33	33	32	31	-
240	-	32	33	32	33	33	33	33	33	33	33	32	33	32	-
267	-	33	32	32	32	32	34	33	34	33	34	33	33	31	-
293	-	30	31	31	31	31	32	32	33	33	34	32	31	30	-
320	-	31	32	32	32	33	32	32	33	33	32	32	32	32	-
347	-	32	32	31	32	32	31	32	33	33	33	31	32	33	-
373	-	31	32	33	32	32	32	32	32	31	31	31	31	31	-
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

図-4.35　各ブロックのスペクトル重心

(kHz)

0	27	53	80	107	133	160	187	213	240	267	293	320	347	373	400
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	-	27	30	33	35	36	34	32	32	34	36	34	30	27	-
80	-	31	31	32	33	34	35	35	33	33	33	34	34	30	-
107	-	35	33	32	32	33	36	36	34	32	31	33	37	31	-
133	-	36	36	35	35	33	32	32	34	33	30	31	33	29	-
160	-	37	37	37	36	34	31	31	34	33	30	30	32	28	-
187	-	37	36	35	35	35	36	35	33	32	32	33	35	30	-
213	-	35	34	33	34	35	37	36	33	32	31	33	36	31	-
240	-	33	31	31	33	35	34	34	32	30	27	30	35	30	-
267	-	31	31	31	33	33	32	32	31	30	29	31	33	29	-
293	-	31	33	34	32	31	31	30	30	32	35	34	32	28	-
320	-	32	34	35	34	33	33	33	32	34	38	36	32	28	-
347	-	35	35	36	36	36	38	37	34	35	39	36	32	28	-
373	-	30	30	30	30	31	32	31	29	30	32	31	28	26	-
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

図-4.36　各ブロックの反発硬度

図-4.37 は、トモグラフィ解析により算出された各ブロックのスペクトル重心と、相当するブロックでの反発硬度との関係を示したものである。

反発硬度とスペクトル重心との相関性はかなり低い結果となっているが、これは反発硬度測定面をサンダを用いて平滑仕上げしたために、断面コンクリートの表面が反発硬度を測定するには脆弱化している部分が局部的に存在しているような状況となっていたためではないかと考えてい

る。**図-4.38、図-4.39** は別のアルカリシリカ反応暴露試験供試体から採用したコアで得られたデータである。今後これらのようにコアや部材での超音波スペクトル重心周波数とコンクリート強度、静弾性係数との関係に関するデータを蓄積すればスペクトル重心からコンクリート強度や静弾性係数を求めることが可能になると考えられる。

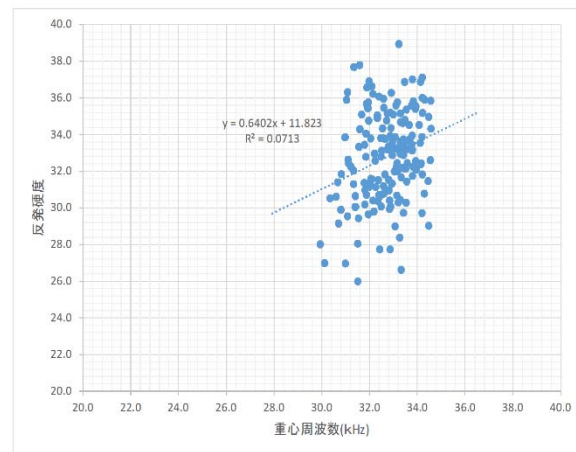



図-4.37　反発硬度とスペクトル重心の関係

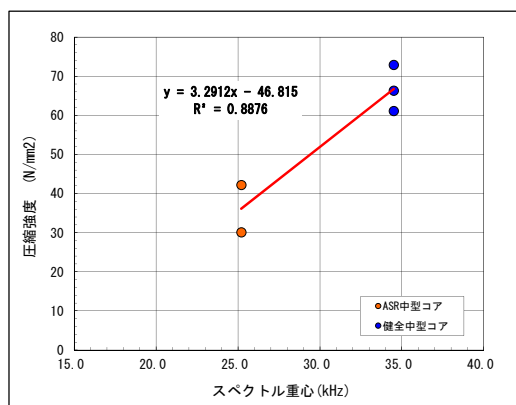



図-4.38　圧縮強度と周波数重心の関係

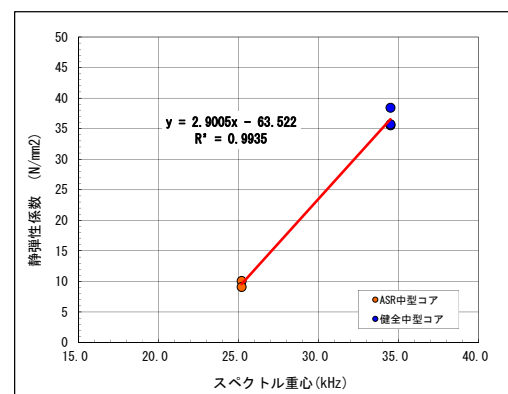



図-4.39　静弾性係数と周波数重心の関係

8）まとめ

(1)アルカリシリカ反応により劣化した試験体に対し超音波トモグラフィ解析で可視化を行ったが、従来の伝播速度をパラメータとした評価方法では、アルカリシリカ反応特有の力学的特性を適切に再現するまでに至らなかった。

(2)距離減衰を考慮したスペクトル重心を適用すれば、超音波トモグラフィの結果より、アルカリシリカ反応により劣化したコンクリートの内部構造の強度推定できる可能性を有していることが分かった。

4.2.2　実構造物への超音波トモグラフィ法の適用検討

4.2.1 (2) の供試体を用いた実験研究から、超音波トモグラフィによってコンクリート構造物断面内部のアルカリシリカ反応によるひび割れ進行状況を把握できることが分かった。本節では超音波トモグラフィを実構造物への適用性に関して、ＰＣ梁橋脚およびＲＣ単柱式Ｔ型橋脚を対象に検討した結果を述べる。

(1) 橋脚ＰＣ梁内部のコンクリート劣化調査

対象橋脚は 1979 年に竣工した構造物であり、1989 年にアルカリシリカ反応による劣化が原因と思われる幅３㎜のひび割れが発見され、調査の結果を受けて表面保護工による補修工事が行われたが、2001 年に最大幅 11mm のひび割れとともに梁部のせん断補強筋が複数破断しているのが発見された。その後 2003 年に炭素繊維シートによる補強工事が実施されている。アルカリシリカ反応による劣化が顕在化した典型的な橋脚である。

本構造物は補修・補強対策として橋脚表面に表面被覆および炭素繊維シートによる補強工事が実施されており、表面外観目視では内部コンクリートのひび割れ進行状態が確認できない状況である。本論文は、橋脚内部のひび割れ発生状況ならびにコンクリートの物理的性状の変化状況を非破壊的に把握する手法として超音波トモグラフィの適用性を検証したものである。

1) 超音波トモグラフィ現場測定方法

調査対象構造物はＴ型橋脚の張出し梁で、測定状況の概要を**図-4.40** に示す。現場作業条件の制約から測定は S_1、S_2 の２箇所で高所作業車を使用して梁をはさみ込む形で実施した。使用した超音波測定装置および超音波トモグラフィ解析手法は、4.2.(2)長期暴露 ASR 試験供試体と同様である。超音波探触子の共振周波数は 40kHz、その印加電圧は1200Vのものを用いた。

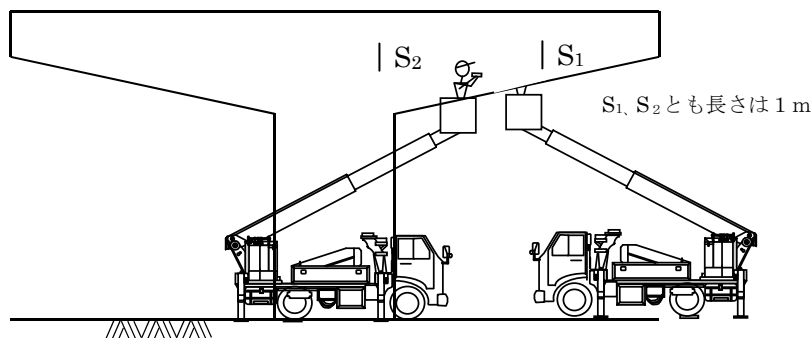
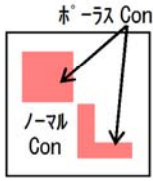



図-4.40　測定断面位置および作業要領図

2) 測定点数の縮減検討

今後の展開を考えた場合、現場作業時の各種制約から、超音波探触子を４周面に配置することが困難な状況も考えられるので、２配置あるいは３面配置で的確なデータが得られるかを事前に供試体実験を行って確認した。**表-4.12** に供試体の仕様を示す。供試体による確認実験は内部欠陥を有する角柱供試体を対象とした。供試体内の所定箇所にポーラスコンクリートを打設することで内部欠陥を模擬し、打設後約６年以上屋外で自然暴露を行ったものである。

表-4.12　供試体の仕様

名　称	供試体の形状寸法 および内部欠陥の仕様	内部欠陥の配置	外　観
内部欠陥 モデル	・500×500×400mm ・一方に偏った小さな欠陥 （14×14cm 程度） ・薄い欠陥（幅５cm 程度）	ﾎﾟｰﾗｽ Con ﾉｰﾏﾙ Con	

測点位置図を**図-4.41** に示す。測定は、鉛直方向は供試体中央断面で、水平方向は各側面で、端部から 50mm の位置から 100mm ピッチで５測点設置し、他の３側面の各測点に対し放射状に計測を行った。測点数は 150 である。トモグラフィ解析は、ブロック割を 15×15 分割で行い、SIRT 法の処理回数は 2000 回とした。

上記の測定データのうちＬ面、Ｒ面の２面のデータを使用したパターンおよびＬ面、Ｒ面、Ｔ面の３面のデータを使用したパターンの２ケースについて解析を行った。

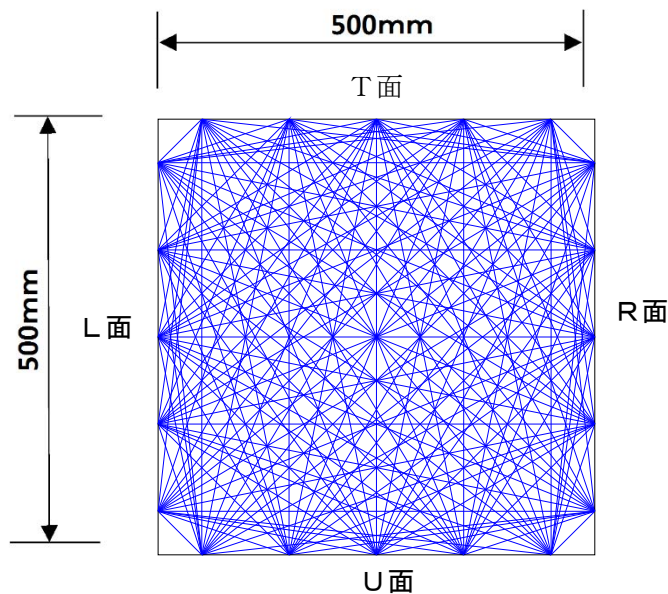



図-4.41　測点位置図

超音波伝播波形のスペクトル重心（距離減衰補正後）を指標とした解析結果を**図-4.42** に示す。解析結果では、３面、２面と測定面を減らすにつれて内部欠陥範囲が大きく表示され、位置のずれや欠陥の影のようなものも見られるが、３面測定であれば劣化の有無や欠陥の位置をある程度

特定することができると考えられる。

この結果から、実橋では４面での解析結果の精度には劣るが、２面、３面での解析結果から劣化の有無や位置を特定することも可能であると考え、実橋では**図-4.43～4.44**に示す2側面およびこれに上面を加えた３側面からの測定を行うこととした。

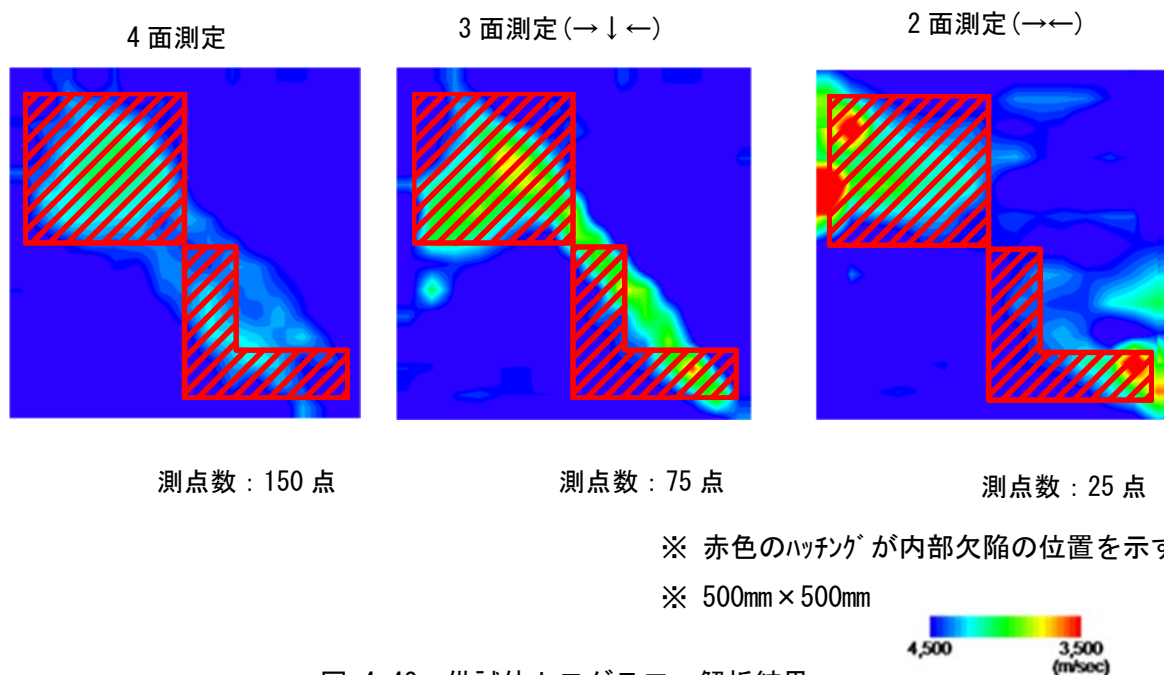



図-4.42　供試体トモグラフィ解析結果

3) 解析結果

超音波トモグラフィ解析は、S1断面、S2断面の２断面で行い、それぞれの断面について、Ｋ面(起点側面)、Ｓ面(終点側面)の２面測定での結果およびＫ面(起点側面)、Ｓ面(終点側面)、Ｔ面(天端面)の３面測定での結果の２パターン行った。解析指標としては、超音波受振波形のスペクトル重心周波数を用いた。これまでの研究によって弾性波は伝播距離によって、反射や散乱の影響を受けることから、周波数の特性を表すスペクトル重心も距離補正を行う必要がある。**図-4.45**は過去の測定データから得られたスペクトル重心と伝播距離との関係を対数曲線で近似したものである。解析設定はメッシュ分割数が縦10、横20分割、色分けは45kHzを最大値（青色）、30kHzを最小値（赤色）として25水準で行った。距離減衰補正後の解析結果を**図-4.46**に示す。

S1、S2断面ともに２面測定結果では、構造物内部の劣化状況を推定できるような周波数分布になっていないが、３面測定では梁上面と側面との隅角部付近に見かけ上、劣化部分があるかのように表示されているが、これはこの部分の上下方向の波線数が全体的に少ないためと考えられる。しかし、側面で局部的ではあるが、低い周波数の部分がとらえられているので、これは水平ひび割れの影響ではないかと考えられる。

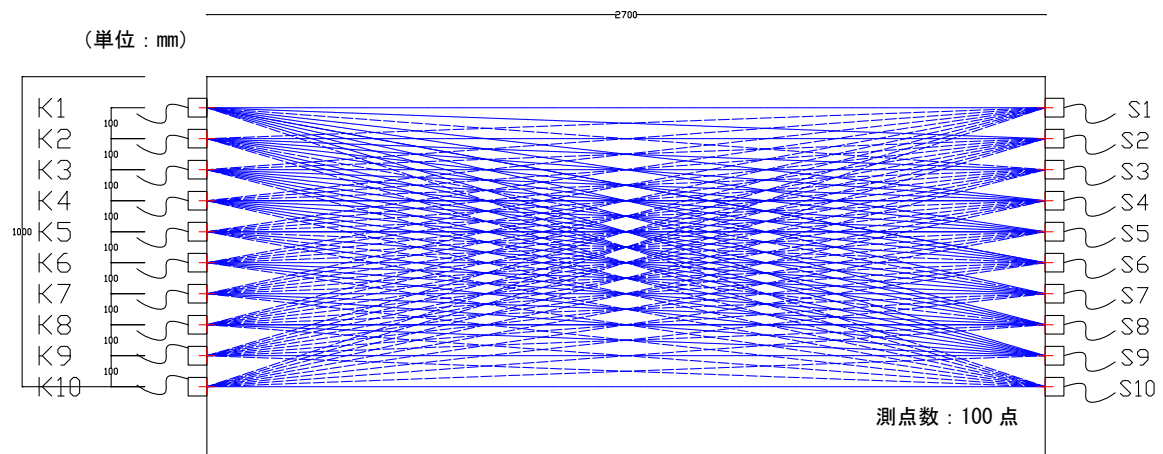



図-4.43　2 面測定の透過イメージ図

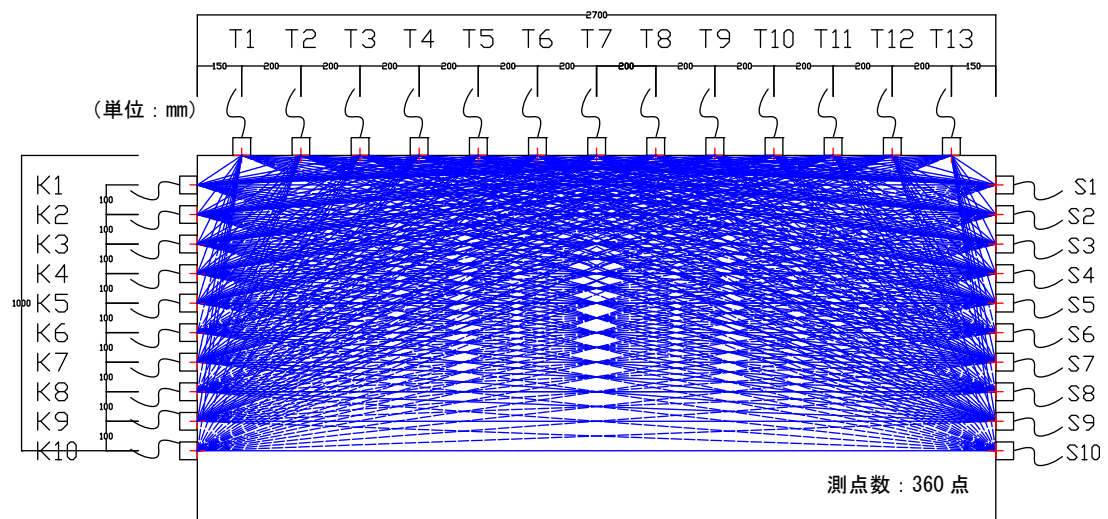



図-4.44　3 面測定の透過イメージ図

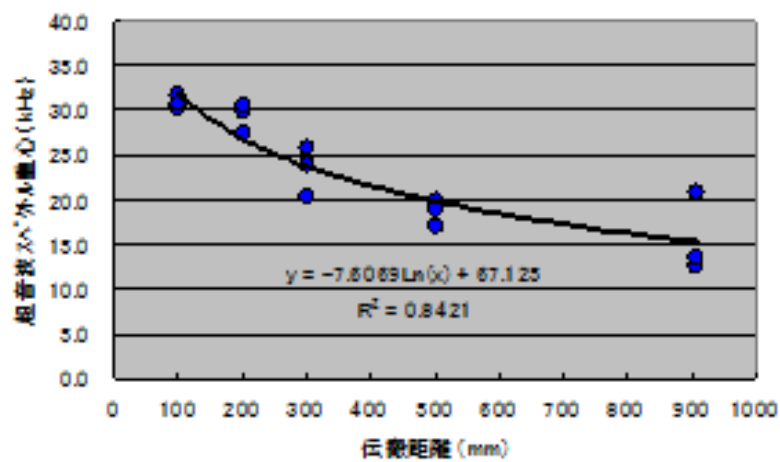



図-4.45　スペクトル重心の距離減衰対数曲線近似図

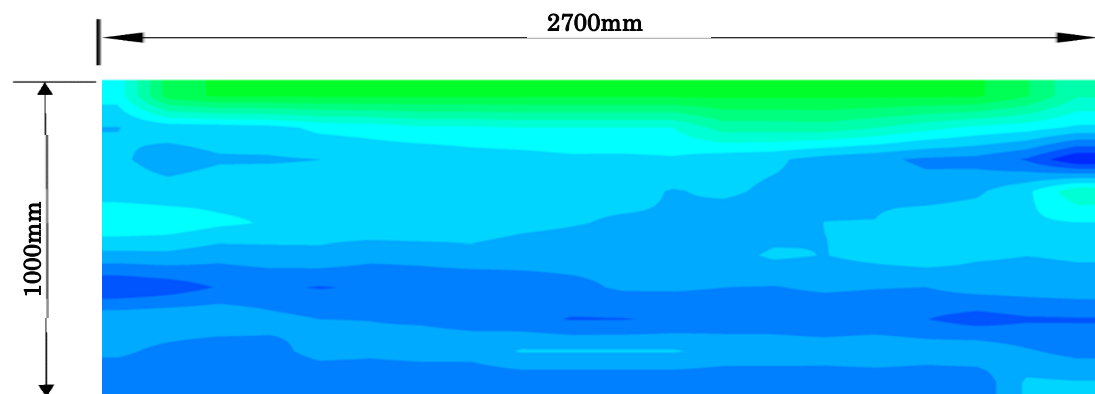
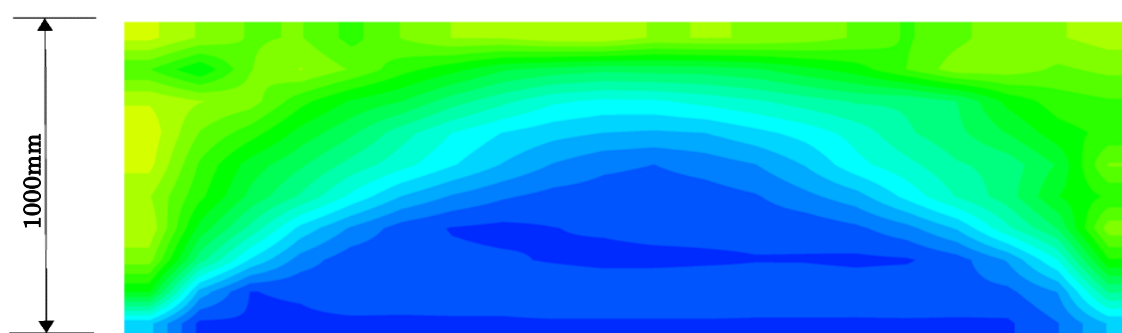
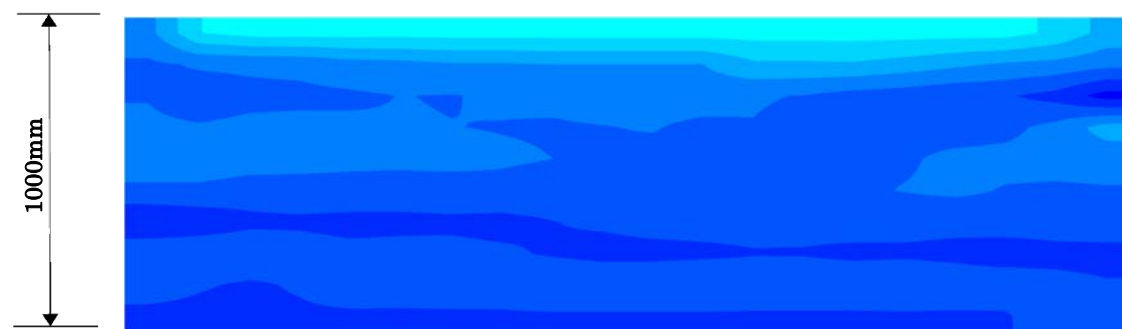
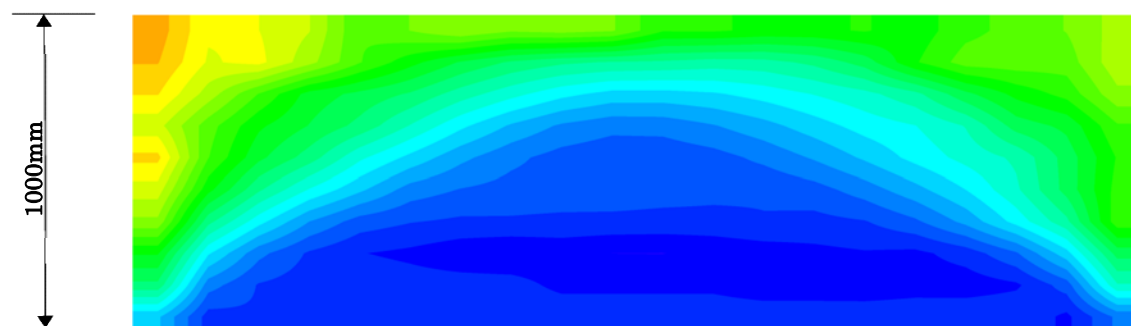
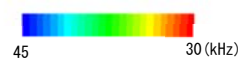



図-4.46　　トモグラフィ解析結果　距離補正後（重心周波数）

4）まとめ

(1)　超音波トモグラフィでは、対象構造物を対称法あるいは斜角法で透過してきた弾性波を利用するが、実構造物の使用環境によっては、構造物を挟み込むように超音波探触子を配置することが不可能な場合もある。今回の測定の結果、４周面のうち下面を除く３面のみを用いた測定点配置でも、アルカリシリカ反応による劣化の進行状況を判定できる可能性が高いことが分かった。

(2)　この場合、伝播した超音波の周波数に距離減衰を考慮したスペクトル重心を用いてトモグラフィ解析を行うことで、超音波伝播速度を利用するよりもアルカリシリカ反応による劣化に対する判定精度を向上させられることが分かった[）]。

(3)　今回調査対象とした橋脚は表面被覆工が実施されており、ひび割れ等の変状を直接確認できなかったが、トモグラフィ解析結果でスペクトル重心が低く表示された部分は、補修前のデータからひび割れが発生していた範囲と一致することから、超音波トモグラフィを用いればアルカリシリカ反応による劣化度を定性的に３～４段階に分類する非破壊検査手法として有効ではないかと考えられる。

（2）橋脚ＲＣ梁内部のコンクリート劣化調査

対象橋脚は大阪市内にあって交通量の多い市街路に立地した建設後 40 年以上経過した道路橋である。アルカリシリカ反応による劣化が進行しつつある構造物であり、ひび割れ幅による劣化度判定は「１㎜以上の明瞭なひび割れが梁天端、側面に発生しており、複数のひび割れが梁端部まで連続している」ことから劣化度Ⅲ（４段階の上から２番目の損傷度）とされている。現時点では鉄筋破断は確認されていないが、採取３本の平均圧縮強度は 16N/㎜^{2}、静弾性係数は 7.7kN/㎡であり、いずれも設計値 27N/㎜^{2}、26.5KN/㎡を大きく下回っている。

今回の調査は表面に発生しているひび割れが構造物内部のどのあたりの深さにまで進展しているのかを非破壊的に検証するために実施したものである。

測定装置および作業要領は、4.2.2 (1) 1) に示した調査方法とほぼ同一であった。路下の交通に与える影響を少なくするために、梁断面に超音波探触子を当てる面数は３面を原則とした。またアルカリシリカ反応による劣化は雨水や日射の影響を受けやすい南側梁の先端に近い断面 (A-A)、南側梁の付け根の断面 (B-B)、北側梁の付け根の断面 (C-C) について測定した。各断面の形状と探触子の配置状況を**図-4.47～4.50** に示す。

写真-4.15　対象橋脚の外観形状

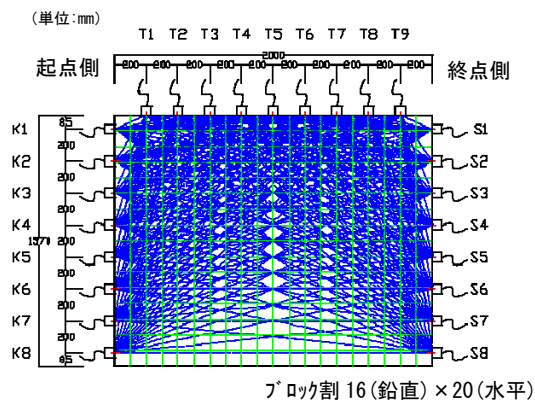



図-4.47　超音波センサー配置
および解析ブロック割図
（ A-A 断面　3 面測定 ）

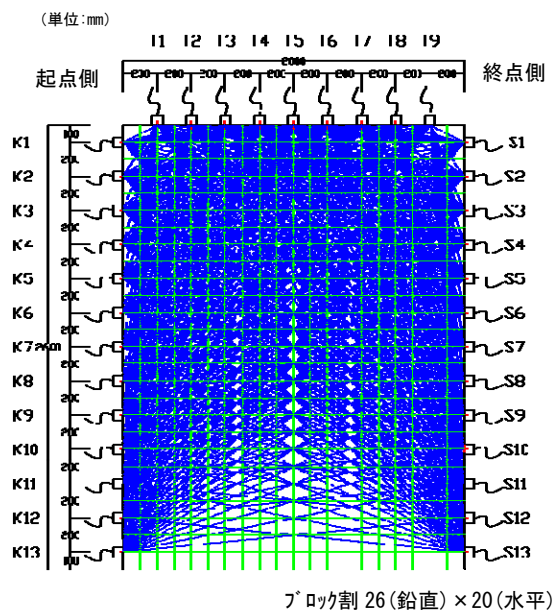



図-4.48　超音波センサー配置
および解析ブロック割図
（ B-B 断面　3 面測定 ）

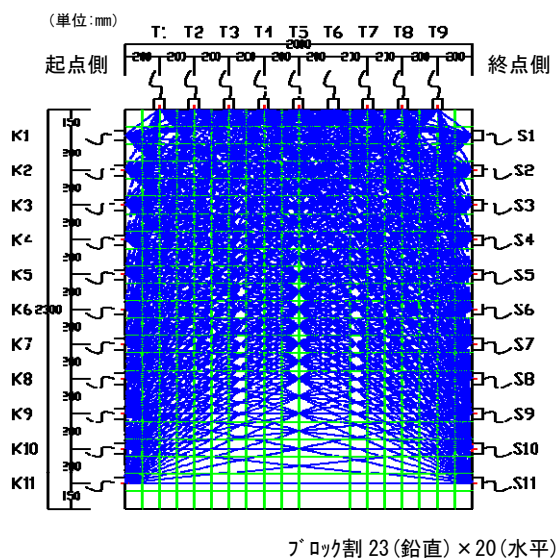



図-4.49　超音波センサー配置
および解析ブロック割図
（ C-C 断面　3 面測定 ）

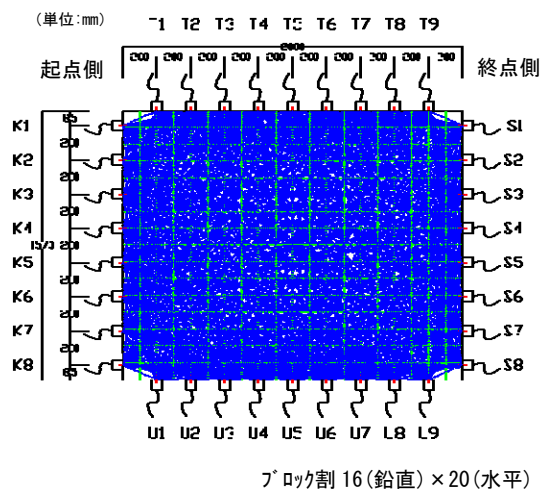



図-4.50　超音波センサー配置
および解析ブロック割図
（ A-A 断面　4 面測定 ）

A-A 断面　３断面測定のトモグラフィ解析画像とその前段階に当たるブロック別分布を**図-4.51**、**図-4.52** に示す。

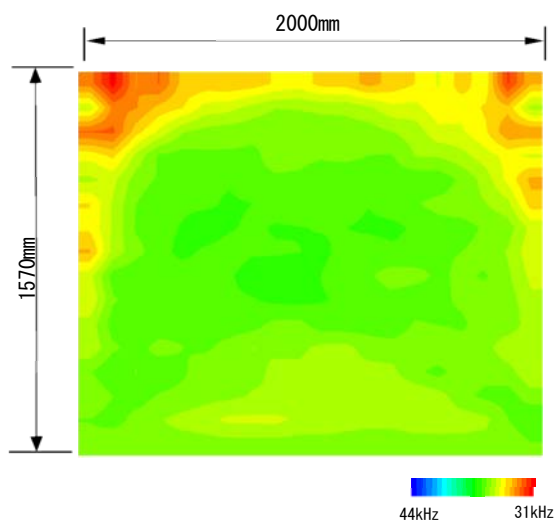



図-4.51　トモグラフィ解析画像
（ A-A 断面 3 面 ）

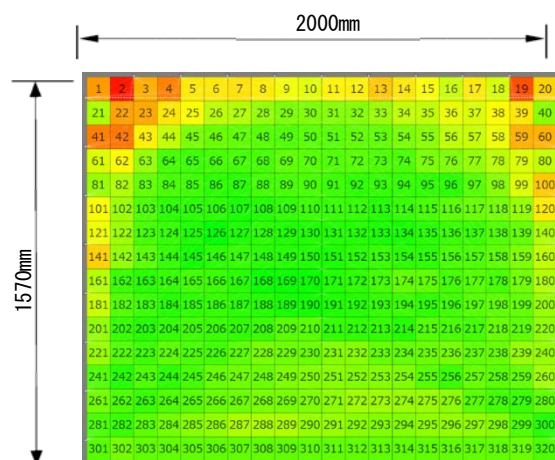



図-4.52　トモグラフィ解析
（ブロック別）（ A-A 断面 3 面 ）

B-B 断面　３断面測定のトモグラフィ解析画像とその前段階に当たるブロック別分布を**図-4.53**、**図-4.54** に示す。

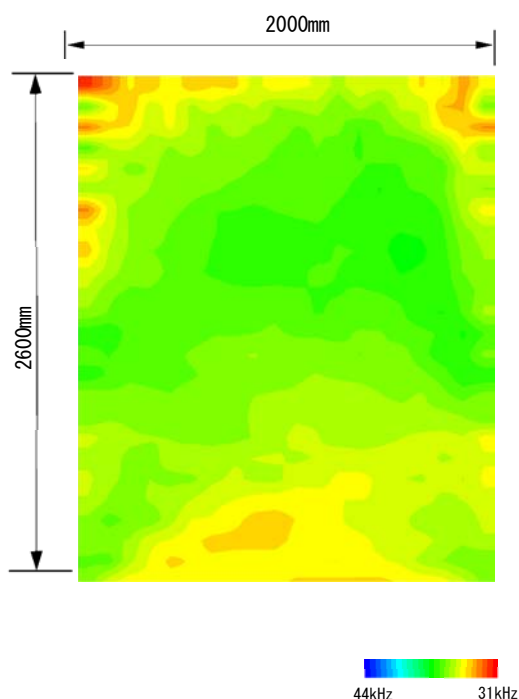



図-4.53　トモグラフィ解析画像
（ B-B 断面 3 面 ）

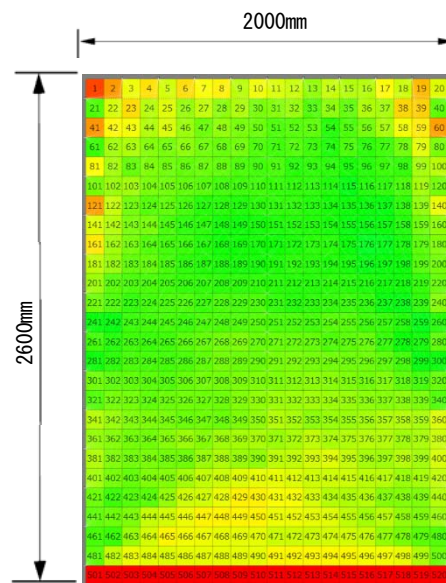



図-4.54　トモグラフィ解析
（ブロック別）
（ B-B 断面 3 面 ）

C-C 断面　３断面測定のトモグラフィ解析画像とその前段階に当たるブロック別分布を**図-4.55、図-4.56** に示す。

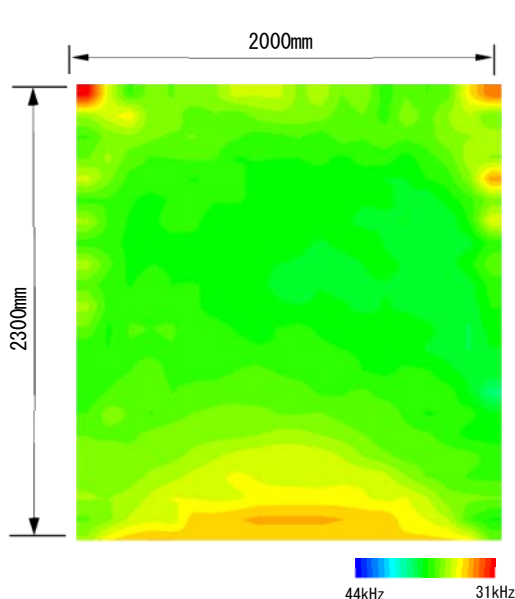



図-4.55　トモグラフィ解析画像
（ C-C 断面 3 面 ）

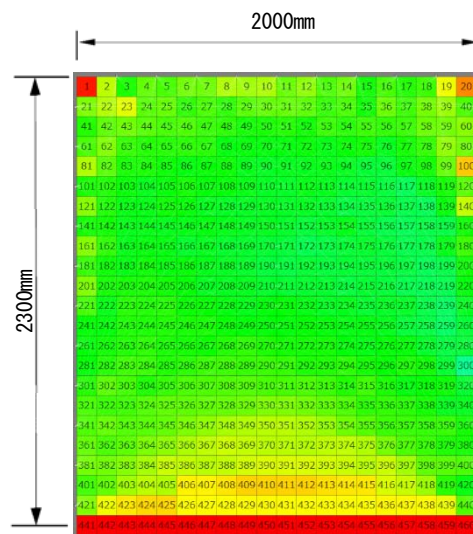



図-4.56　トモグラフィ解析
（ブロック別）
（ C-C 断面 3 面 ）

A-A 断面の４周面に探触子を配置した場合のトモグラフィ解析結果を１段階前のブロック別表示とともに**図-4.57、図-4.58** に示す。

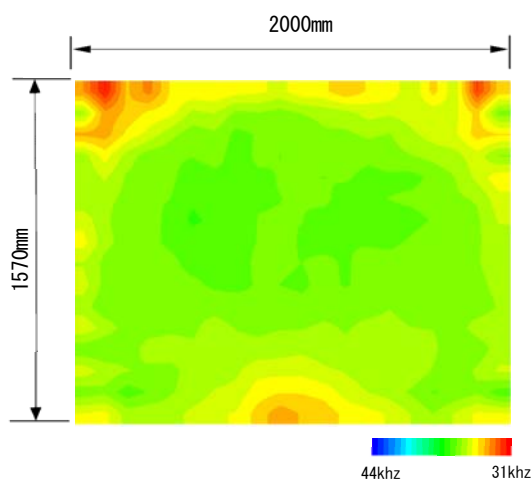



図-4.57　トモグラフィ解析画像
（ A-A 断面 4 面 ）

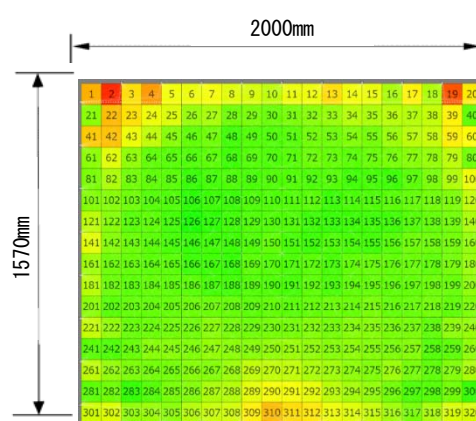



図-4.58　トモグラフィ解析
（ブロック別）（ A-A 断面 4 面 ）

前出の A-A 断面の３面配置に比べて、上辺や側面でのスペクトル重心の低い箇所の位置がより明確になっている。また３面配置で少し不明確であった下面中央部も内部に向けて劣化部分が 20～30cm 程度進行している可能性があるのではないかと考えられる。

当該橋脚の梁先端部を A-A 断面で切断した場合の状況を、トモグラフィ解析画像を組み込んで外観ひび割れ写真と合成し、**図-4.59** に示す。

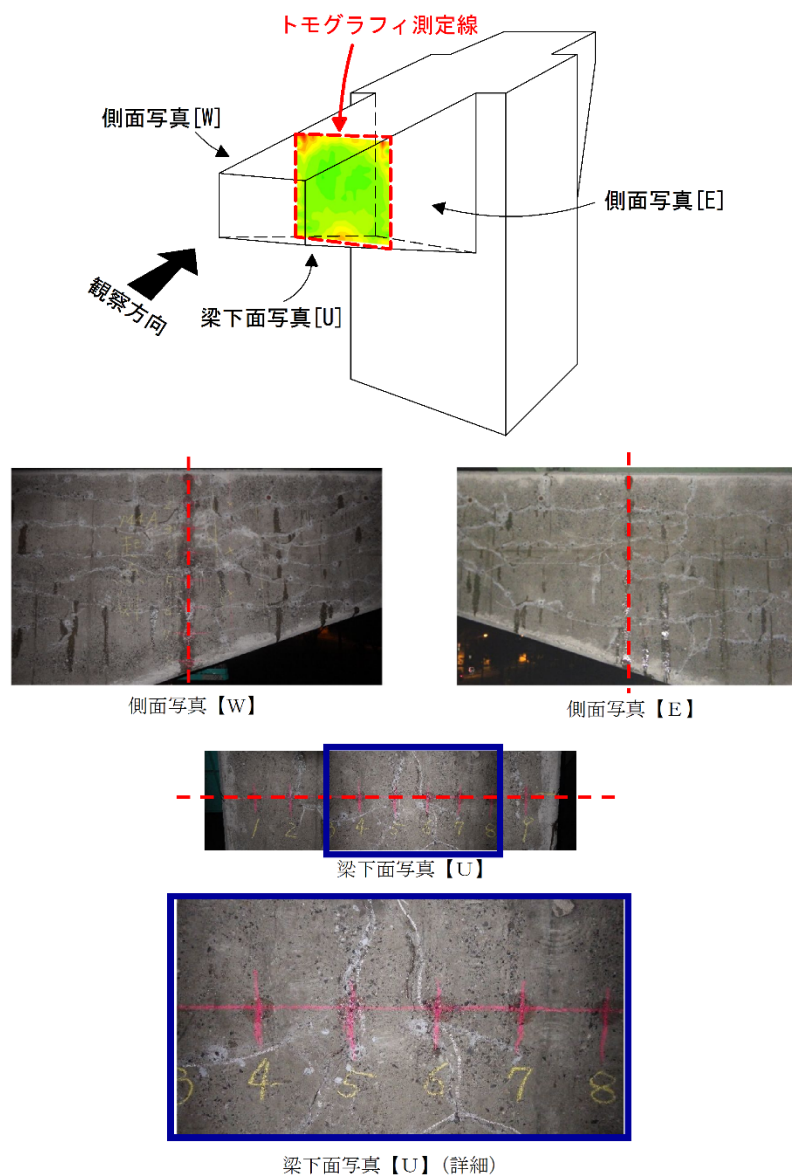



図-4.59　トモグラフィ解析した A-A 断面とその周辺の外観写真

梁上面には防水層が塗布されており、ひび割れ状況は確認できないが、梁の側面や下面の測線５、６付近に多くのひび割れが確認できていることから、梁軸方向に数本の幅の大きなひび割れが梁の中央に向かって発生していたためではないかと推察される。また側面のひび割れとトモグラフィ解析図の低周波域とが傾向として合致していると考えられる。また梁下面中央部には写真にも見られるように幅１mm近いひび割れが発生しており、上面に向かって 20～30cm 程度進展しているのではないかと推定される。

以上の検討結果から、部材内部の ASR 劣化損傷を詳細に検討する必要がある場合は、３面の探触子配置よりは４面配置のほうが、見落としが少なくなると考えられる。３面配置でも結果を詳細に検討できる技術者が担当するのであれば、見落とす可能性は小さくできるであろうが、その場合には外観変状の存在が疑われる場合に、その部分を透過した超音波波形の周波数特性等も検討する必要がある。

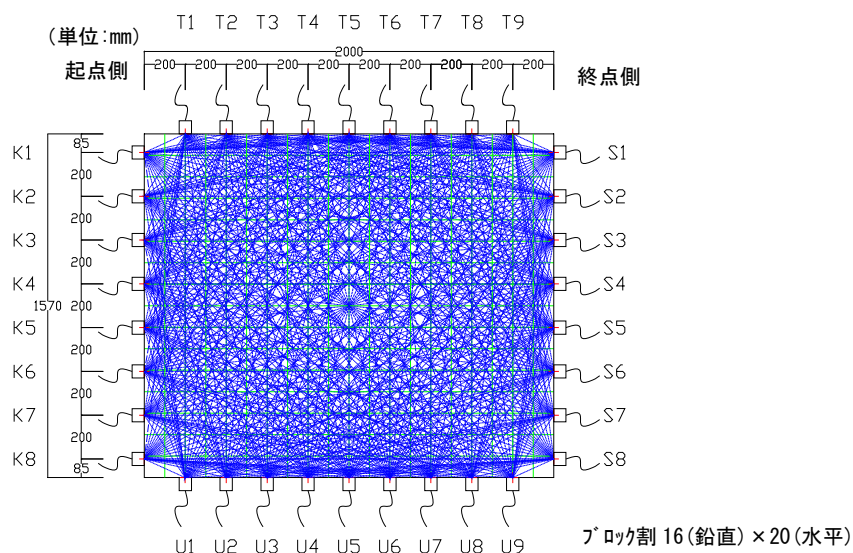



図-4.60　超音波センサー配置および解析ブロック割図（ A-A 断面 8×9 測点 ）

現場作業条件等の制約から時間的な余裕が取れない場合は、測線数を減らすことも考えられる。ここでは超音波測定点数を上記の 72 から 20 に減少させる場合について検討を行った。

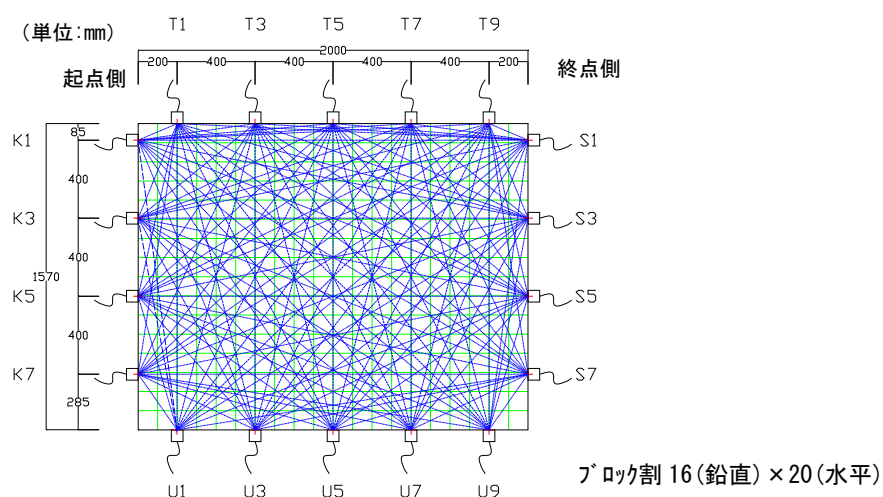



図-4.61　超音波センサー配置および解析ブロック割図（ A-A 断面 4×5 測点 ）

下図は**図-4.61** で示した測線間隔を大きくした場合のトモグラフィ解析結果を示したものである。**図-4.57、図-4.58** の結果と比較するとスペクトル重心周波数の低い部分が数や範囲ともに増加しているが、分布傾向はほぼ同一であって、３面配置で見落としそうになった下面中央部の欠

陥も明瞭に把握できていることが分かる。

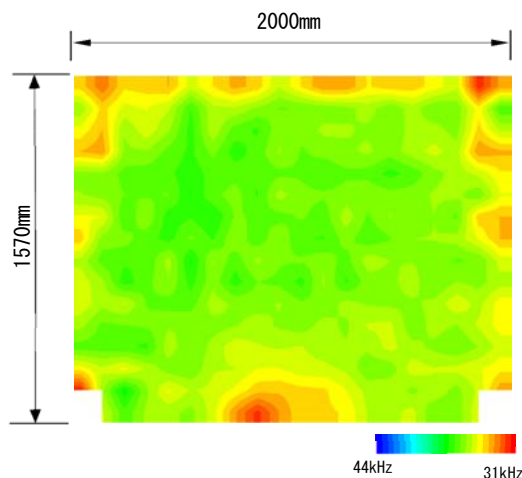



図-4.62　トモグラフィ解析画像（ A-A　4×5 測点　4 面 ）

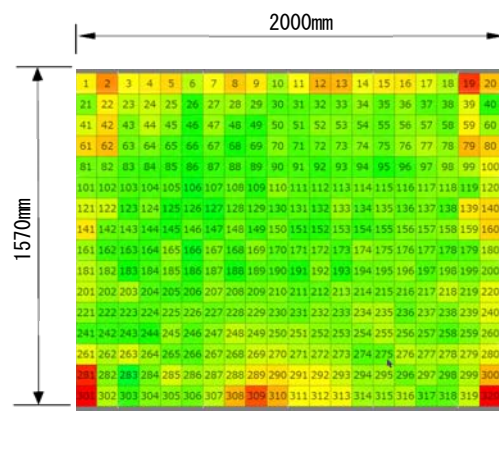



図-4.63　トモグラフィ解析画像（ A-A　4×5 測点　4 面 ）

以上の検討結果から、実構造物においてアルカリシリカ反応による劣化を超音波トモグラフィで把握するためには、探触子は可能な限り４面配置とすることが望ましい。ただし、劣化による変状の進行メカニズムが明らかになっており、変状の進展位置が予想できる場合には、その部分を取り囲む３面配置とすることにより有効なデータが得られる。

4.3　本章のまとめ

アルカリシリカ反応が顕在化した構造物内部のコンクリートの劣化の進展に着目し、それらの劣化状態を非破壊検査手法によりどのように把握し評価できるについて検討を行った。得られた成果を以下に示す。

1）　アルカリ骨材反応による損傷が顕在化した構造物において、超音波斜角法による伝播速度の測定を行い、探触子間距離を補正を行えば、内部劣化深さの推定が可能である。得られた推定値をコア採取あるいは部材切断により検証した結果、劣化深さの実測値と良く一致した。

2）　斜角法による測定は探触子が斜めに配置されるため、対面で透過させる測定法に比べ、より大きなエネルギが必要となる。超音波装置および探触子を選定する際には留意が必要である。

3）　アルカリシリカ反応により劣化した試験体に対し超音波トモグラフィ解析を用いた可視化を検討した結果、従来の伝播速度をパラメータとした評価方法では、アルカリシリカ反応特有の力学的特性を適切に再現するまでに至らなかった。

4）　トモグラフィ解析において、伝播した超音波の周波数に距離減衰を考慮したスペクトル重心を用いると、超音波伝播速度を利用するよりもアルカリシリカ反応による劣化に対する判定精度を向上させられることが分かった。劣化したコンクリートの内部構造の強度推定でき

る可能性も確認できた。

5） 超音波トモグラフィでは、対象構造物を対称法あるいは斜角法で透過してきた弾性波を利用するが、実構造物の使用環境によっては、構造物を挟み込むように超音波探触子を配置することが不可能な場合もある。今回の研究の結果、４周面のうち３面のみを用いた測定点配置でも、アルカリシリカ反応による劣化の進行状況を判定できる可能性が高いことが分かった。

6） 超音波トモグラフィ法の実構造物への適用については、表面被覆等が施工された構造物の内部コンクリートの劣化状態を定性的に３～４段階に分類する非破壊検査手法として有効であると考えられる。

【参考文献】

4-1) 安藤高士、松本茂、佐々木一則：アルカリ骨材反応による劣化を生じた橋脚の調査・補修事例、コンクリート構造物の補修・補強、アップグレード論文報告集、第 4 巻、pp.75～80、2004.10

4-2) 土木学会コンクリート委員会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書―鉄筋破断と新たなる対応―、コンクリートライブラリー124、2005.

4-3) 鳥居和之、樽井敬三、大代武志：能登半島の ASR 劣化構造物に関する一考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、No.1、pp.779-784、2006.

4-4) 河野哲也：アルカリ骨材反応による損傷を受けたフーチンに対する損傷度評価および補修・補強方法に関する研究、京都大学、博士論文、2014.3

4-5) 阪神高速道路管理技術センター：ASR 構造物の維持管理マニュアル、㈱電気書院、2007.2

4-6) 佐々木一則：アルカリ骨材反応を生じた鉄筋コンクリート構造物の鉄筋破断原因究明と維持管理方法に関する研究、京都大学、博士論文、pp.159～163、2011.9

4-7) 葛目和宏、森　雅司、松本　茂：アルカリ骨材反応を生じた構造物に適用する非破壊検査、コンクリート構造物の補修・補強、アップグレード論文報告集、第 2 巻、pp.171～178、2002.10

4-8) 明石外世樹：コンクリートの非破壊試験に関する研究、土木学会論文集
第 390 号／V-8、1988.2

4-9) 高田雄大、塩谷智基、大津政康：弾性波の周波数応答特性による不均質材料の損傷評価に関する研究、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告書、pp.363-368、第 12 巻　2012.11

4-10) 木村芳幹:超音波トモグラフィ法によるコンクリート構造体品質の推定、GBＲＣ:Vol.33、No.2、2008.4

4-11) 葛目和宏、真鍋英規、小椋紀彦、山本貴士、宮川豊章：超音波トモグラフィによる ASR 劣化したコンクリート内部性状の把握に関する検討、コンクリート構造物の補修・補強、アップグレード論文報告集、第 13 巻、pp.181～188、2013.11

第５章　結　論

本論文では、筆者がこれまでに経験してきたコンクリート構造物の非破壊検査の中から、外観だけでは実態を把握し難い事項で、とくに放置すると構造物の性能に大きな影響を与える可能性がある次の２項目を取り上げた。

⑴ＰＣグラウト充填状況調査

⑵アルカリシリカ反応が顕在化した構造物内部の劣化調査

本論文はこれらの損傷に関して、衝撃弾性波法、超音波法という２つの弾性波法を中心とした非破壊検査法について研究した結果を整理したものである。これらは、劣化がコンクリート構造物内部で進行していくもので、目視点検だけでは実態を把握し難いことから、簡便で適切に評価できる非破壊検査方法を提案することができれば、社会インフラの長寿命化に資するところが大きいと考えられる。

弾性波法は、コンクリート構造物に与えた弾性波が欠陥部あるいはコンクリートの力学特性などによって変化して伝播する挙動をとらえ、評価したい物理的指標（寸法、形状、密度など）を推定しようと実施されるものである。弾性波法は、一般に弾性波の発振方法や受振方法の違いによって①衝撃弾性波法、②超音波法、③打音法、④ＡＥ法の４種類に分類されるが、汎用性やこれまでの使用実績から衝撃弾性波法、超音波法が広く取り上げられることが多い。

実際の現場において弾性波のどのような基本原理・基本特性を用いるのが適切か、そのためには測定方法として留意すべき事項はなにかという点を考慮して４種類の中から選定するところに弾性波法の特徴がある。しかし、このことが経験の少ない技術者が簡単に採用に踏み込めない理由の一つであり、現時点で弾性波法が維持管理の現場で、完成した方法として広く採用されない原因かも知れない。弾性波法はコンクリートの品質評価から、構造物の欠陥探査まで広範囲に適用できることから今後の創意工夫によっては、高齢化した多数のコンクリート構造物の長寿命化に取り組んでいく上で有用な非破壊検査方法となる可能性が高いと考えられる。

5.1　本論文で得られた結論

5.1.1　第２章「コンクリート構造物の非破壊検査に関する既往の研究」で得られた結論

膨大で多種多様な社会インフラを適切に維持管理していくためには、目視点検で把握が可能なコンクリート表面に表れているひび割れや浮き、漏水などの位置や、その程度だけでなく、構造物内部での変状の進行を把握することが、将来の劣化予測を踏まえた維持管理対策を検討する上で重要な情報となる。

２章ではコンクリート構造物の維持管理上、とくに内部の変状状態が問題として取り上げられる機会が多い、①ポストテンション方式ＰＣ構造物のグラウト充填不良の評価、②アルカリシリカ反応が顕在化した構造物内部のコンクリートの状態という課題に対し、評価検討に適用することが可能と考えられる非破壊検査技術の現状を整理した。

その結果から、本論文における課題の解明方法として弾性波法に分類される衝撃弾性波法、インパクトエコー法、超音波斜角法、超音波トモグラフィ法が適していると判断した。

弾性波法は、その伝播特性を「伝播速度」「振幅」「周波数」の３通りで表現できる。伝播経路や弾性係数の変化の影響を受ける「伝播速度」、反射や散乱などの減衰により変化する「振幅」、伝播経路における欠陥の大きさ、分布状況や反射、散乱の影響を受ける「周波数」といった伝播特性である。対象とするコンクリート構造物は弾性体として見なせることから、弾性波の入力方法や、出力の捉え方を的確に組み合わせれば、本論文の課題を解明できる手法である。

5.1.2 第3章「ＰＣグラウト充填状況の非破壊検査方法」で得られた結論

「横締めＰＣ鋼材の衝撃弾性波法によるグラウト充填状況調査」では、ＰＣ橋上部工の横方向に配置されている横締めＰＣ鋼材の一方の対象とするＰＣ鋼材定着部直近のコンクリート表面からハンマあるいはバネポインタを用いて弾性波を発振し、他方のＰＣ鋼材定着部直上付近に設置した探触子（ＡＥセンサ）によってＰＣ鋼材を伝播した弾性波を受振して、その伝播特性を分析することでグラウト充填状況を判定する方法を提案した。このグラウト充填状況調査方法は、開発に当たり可能な限り非破壊検査であること、装置、方法が簡便であることが要求された。これは調査対象であるＰＣ上部工、例えばＴ桁橋やＩ桁橋では、床板横締めが 50㎝ 間隔で、横桁横締めは横桁１本あたり２本程度配置されていることもあるため、横締めＰＣ鋼材のグラウト充填状況調査対象数量は数十本/径間となるためである。

まず供試体実験では、ハンマ打撃によって発振された弾性波が鋼材定着部からＰＣ鋼棒を伝わってもう一方の定着部に伝わること、その弾性波はグラウト充填状況によって速度や振幅（エネルギ）、周波数などが変化すること等が確かめられた。実験結果を要約すると

- 衝撃弾性波法では、横締めＰＣ鋼材を伝播してきた弾性波の特性がコンクリート表面に設置した出力センサで検知でき、グラウト充填状況を 3 段階に評価することは可能である。
- グラウトが充填されていれば、グラウトがＰＣ鋼材の振動エネルギを拘束することから、伝播エネルギは小さく、伝播速度も小さくなる。
- グラウトが充填されていなければ、ＰＣ鋼棒はシース内のグラウトによる拘束を受けないので、振動エネルギや伝播速度が大きい。

この結果を受けて、３径間ではあったが幅員 10ｍの実橋で衝撃弾性波法の測定を行い、その後シース内部を観察して次のような結果が得られた。

- グラウトが十分に充填されていれば、受振波形の最大振幅は 0.3mV 以下で、周波数帯も 20kHz 以下となる。
- グラウトがほとんど充填されていなければ、受振波形の最大振幅は 80mV 程度となり、周波数帯も 20kHz を超えるものが大部分となる。
- グラウトの充填状況が中途半端な状態では、最大振幅、周波数帯とも上述の中間となる。

以上の供試体実験、実橋での試験施工結果から、衝撃弾性波法を用いて、ＰＣ鋼棒の飛び出し事故の発生した近隣の同時代に建設された同形式の橋梁区間約３㎞ に関しては、横締めＰＣ鋼材のグラウト充填状況の検査を行い、未充填部分については再充填が行われた。

それ以降、同様な横締めＰＣ鋼材の腐食、破断事故を受けて、管理者からの依頼で衝撃弾性波法を用いた横締めＰＣ鋼材のグラウト充填状況調査を実施してきた。調査内容は、横締め鋼材がＰＣ鋼棒、ＰＣ鋼より線、ＰＣ鋼線の３種類ではあったが、横締め長さが 2.0m～19mの範囲であり、約 5,000 データを収集、整理した。その結果から、現時点では衝撃弾性波法の検査結果を縦軸に入出力比、横軸に伝播速度をとって測定データを表示すれば、横締めＰＣ鋼材全長にわたるグラウト充填状況を「充填」「部分的な未充填あり」「ほとんど充填されていない」の３段階に分類することができる。

実橋床板や横桁では、上部工形式、ＰＣ鋼材の種類、ＰＣ鋼材の長さ等のほかにコンクリートやグラウトの配合、施工条件等が異なるため、グラウト充填状況を区別する閾値の設定は径間毎に異なると考えられる。閾値になると思われるいくつかの測点で実際に削孔を行って、ある程度の幅を持たせた閾値を設定すれば、実用的な判定基準を設定することができると考えられた。

また、ＰＣ梁橋脚の梁部分にも、道路軸直角方向にＰＣ鋼棒が配置されていることから、シース内のグラウトが完全に充填されていない場合、ＰＣ上部工の横締め鋼材と同様に雨水や有害物質がシース内に浸入して鋼材の腐食、破断が起っている。ＰＣ梁橋脚では、鋼材長さが通常の上部工幅員の約 10mに比べると 20～30mと長い場合が多く、上記の上部工に適用した衝撃弾性波法と同じような測定方法と受振波の分析方法とで、グラウト充填状況の判定ができるだけではなく、建設時のグラウト充填管理にも使用できることが分かった。ただし、ＰＣ梁では鋼材間隔が床版より狭いので隣合うシース内の充填状況が極端に異なると、隣接するシース内のグラウト充填状況の影響を受けやすくなるため、入力はＰＣ鋼材軸方向に合わせて発振し、受振波も探触子を軸方向に合わせること、鋼材長さが 30m前後となると入力方法もバネポインタよりも、エネルギの大きくなるハンマを用いる方が受振波形を把えやすくなること等に注意しなければならない。

「縦締めＰＣ鋼材のインパクトエコー法によるグラウト充填状況調査」では、アメリカにおいて、コンクリート構造物内部のひび割れや空隙の探査方法として規格化されているインパクトエコー法の適用性を検討した。インパクトエコー法では、検査対象となるシースの真上のコンクリート表面に鋼球を打ちつけて縦波を発生させ、その縦波が部材境界面やシース表面で反射してくる状態を縦波共振波の多重反射として検知できれば、その反射波を FFT 解析しスペクトルピークと関連付けて、板（部材）厚やシースの位置、グラウト充填状況を判別できるものである。

ＰＣ桁を単純にモデル化した供試体では、入力した弾性波と受振した弾性波を評価したい部材厚みやシース位置、グラウト充填状況等と互いに関連付けて分析できることから、グラウト充填状況は判定しやすい。しかし実構造物では想定外の気泡やひび割れ、あるいはシース周辺のブリージングによる隙間等の影響を受けて、評価したい部材厚やシースからの反射が弱くなり、とくに多重反射の現象を把え難い状況になることが多い。最も重要なシースからの反射はシース径が 40㎜ 前後と小さい場合、シース面の曲率も小さくなって反射方向が拡散するため、微弱な信号となりやすい。

このように、本来多重反射してくるはずのシースからの反射が繰返し回数が少なくなるためFFT変換を行って、パワースペクトルからピーク周波数を読取ることが難しい。その場合の対処法として、窓関数の１つであるMultitaper Method (MTM) による解析や、表面波の影響を除去するための解析範囲を検討してみたが、有力な方法は見つけることはできなかった。

インパクトエコー法により実橋において400〜500測点のグラウト充填状況調査を行い、グラウト充填状況を充填、充填不良、未充填の３段階に分類し評価を行ったが、削孔結果とほぼ一致する傾向となり、完全充填に関しては、少し厳格な評価（安全側の）をするようである。

ただし、受振波形を観察して正しい計測ができているか否かを、明確に判断できる基準を設定しておかなければ、厳密なグラウト充填状況調査は難しいと考えられる。

5.1.3　第４章「アルカリシリカ反応が顕在化した構造物の非破壊検査方法」で得られた結論

「斜角法によるコンクリート構造物内部の非破壊検査」では橋脚梁部分の上面と側面、あるいは上面と端面との隅角部付近に対して超音波斜角法の適用を検討した。アルカリシリカ反応による劣化は、これらの部分に幅の大きなひび割れが発生しやすいのが特徴の１つである。これは、これらの部分が雨水や日射の影響を受けやすい場所にあるため、アルカリシリカ反応が進行しやすいこと、この部分の構造細目がコンクリートの膨張を制御するようには定められていないこと等が原因ではないかと考えられる。この傾向はほぼ全国共通ではないかと考えられることから、維持管理上この部分のひび割れやコンクリートの浮きなどが重要になる。この部分では、幅の大きなひび割れを介して、雨水の浸透等が懸念され、アルカリシリカ反応や鉄筋腐食によってコンクリートに微少なひび割れの発生を促し、また梁上の支承の振動の影響もあって、ひび割れの進行やコンクリートの浮きなども生じ始めることも想像される。したがってこれらの部分では、ひび割れの内部への進行を把握して、対策を講ずることが劣化の拡大を防ぐ観点から重要である。

斜角法では、隅角部から超音波探触子までの距離を100、200、300、・・・、500、600mmと遠ざけていき、伝播時間（速度）が異なる部分を劣化深さと推定することができる。なお、この方法では、探触子間の距離が小さくなると、伝播距離を補正する必要が生じるので注意が必要である。斜角法で劣化深さを推定した箇所でのコア採取や部材切断によって劣化深さを確認したところ、推定値は実測値の0.94〜1.14倍の範囲にあり、実用的な方法であると考えられる。

「トモグラフィ法によるコンクリート構造物内部の劣化調査」では、超音波法を用いて、医療面でも活用されているＣＴ（Computer Tomography）技術を応用し、コンクリート構造物中で生じたアルカリシリカ反応による劣化部分の推定を試みた。超音波測定装置そのものの規格化がわが国ではなされていないが、印加電圧が1000Ｖ以上であれば幅２〜３ｍ程度の橋脚を透過させる程度のエネルギを発揮できるので、共振周波数100kHz以下の探触子を用いれば、超音波トモグラフィ解析を行って、アルカリシリカ反応による劣化部分を推定できる可能性がある。

アルカリシリカ反応により劣化した供試体に対して、超音波トモグラフィ解析により構造物の劣化状態を可視化する試みには、超音波伝播速度よりも周波数の振動減衰を考慮したスペクトル重心を用いると、劣化範囲をより明確にできると考えられる。

超音波トモグラフィでは、対象構造物を対称法あるいは斜角法で透過してきた弾性波を利用するが、実構造物の使用環境によっては、構造物を挟み込むように超音波探触子を配置することが不可能な場合もある。今回の検討の結果、４周面のうち３面のみを用いた測定点配置でも、アルカリシリカ反応による劣化の進行状況を判定できる可能性が高いことが分かった。超音波トモグラフィ法の実構造物への適用については、表面被覆等が施工された構造物の内部コンクリートの劣化状態を定性的に３～４段階に分類する非破壊検査手法として有効であると考えられる。

トモグラフィ解析結果から、スペクトル重心の分布を色調の変化で表すことによって劣化の進行している内部をある程度評価できるが、最終的には強度あるいは静弾性係数に置き換えて、表示できることが望ましい。このためには、内部コンクリートの物性データを収集し、トモグラフィ解析結果から構造物内部のひび割れ状況やコンクリート物性の分布を類推できるように、今後資料の収集が急がれる。

5.2　コンクリート構造物維持管理シナリオにおける弾性波法の利用

5.2.1　維持管理における非破壊検査の位置づけ

わが国の社会インフラは、高度経済成長期に集中的に整備されたこともあって、今後これらの補修や補強、更新などの必要性が急激に高まってくる可能性が高いと予想されているにも係わらず、国・地方共に厳しい財政状況にあり、いかに適切に持続可能な社会インフラの整備を進めていくのかが重要な課題となっている。

コンクリート構造物の安全・安心を確保するためには、維持管理を点検、診断、措置、記録の４つの項目に分け、これをメンテナンスサイクルとして構築し、これをスムーズに回転させて長寿命化計画等の内容を充実させていくことが　社会資本整備審議会　道路分科会から提案されている。これまで、インフラ整備は声高に進められてきたが、その維持管理に関して、ほとんど実効的な対策が取られてこなかったのが実情である。現時点で、急にインフラストックの長寿命化を図り、適切に維持管理を進めるべしと号令をかけられて、その趣旨に賛同できても、具体的な対応策を思い描ける技術者は少ないのではないかと考えられる。

このため社会インフラの維持管理は、社会全体として体制作り、組織作りから　わが国の総力を挙げて取り組むべき、課題であるといえる。そのためには国土交通省だけでなく、構造物を管理する行政機関すべてが、足並みをそろえることが重要であり、先ずもっともストック量の大きな道路構造物の点検を一斉に開始し始め、これを手がかりに維持管理を進めていこうとするのは現実的な対応として当然であると考える。そういう観点からは、構造物の性能を５年に一度とはいえ、接近してたたき点検などで損傷を把握しようとする方向性は合理的な維持管理を行っていくうえで基本的に重要な第一歩を踏み出したともいえる。

先行する点検が目視主体で行われることは、構造物の実態を大まかに損傷度別にランク分けする上では基本的な行為であるが、その後一定の間隔で実施する点検も目視やたたき点検主体で継続することは、少し問題がある。現在の定期点検では、構造物管理者は、構造物に接近して、目視およびたたき点検を主体に構造物の性能低下に直結するような変状の検出を第一義としている。しかし、この目

視点検とたたき点検には大きな問題点が存在する。すなわち、点検結果が点検員の習熟度や、作業環境などに左右されやすいという問題がある。例えば、外観目視検査の成果としてひび割れ状況図が作成されるが、点検員の資質により取り上げるひび割れの選択基準が異なること、記入方法に個人差があること等から、ひび割れ状況図を作成しても、ひび割れ発生状況の経年的な比較が困難であるとの指摘がなされることもある。補修等を行っていないにもかかわらず、前年確認されていたひび割れが、今年の調査結果では記載されていない等の問題点も報告されている。たたき点検についても同様で、点検員により、特に浮きの判断が異なるケースが多々認められる。その結果として、出来上がった損傷状況図が点検員により異なり、目視検査同様、経年変化の有無が的確に把握できないこととなる。

すなわち、見ようとしても見えない場合もあれば、外観だけでは実態を把握できない場合も当然出てくると予想される。目視だけでは技術的な判断が難しいデータや、経時変化を把握するためのデータなど収集は非破壊検査で行うことが必要になる。構造物の維持管理において、非破壊検査手法はコンクリート構造物を破壊することなく、構造物内部のコンクリートや鋼材の状態を数値データ等で把握することができる上、非破壊であるがゆえに、コスト面を別にすれば、測定回数の制約がなく、経年的な評価を行いやすいという特徴があり、強みでもある。ただし、この特徴あるいは強みが適切に活かされているのかどうかについては、必ずしも非破壊検査に対する理解度、信頼度が十分ではないこともあって、活用される頻度はまだまだ低い。

5.2.2　維持管理における弾性波法の適用

本論文で取り上げた「弾性波法」は、これまでの実績から、コンクリートの品質から構造物の形状、内部欠陥まで評価できるコンクリート構造物に適した汎用性のある非破壊検査方法であると考えられる。これは、弾性波の発振から受振までの計測システムや、データの解析方法が一通り揃っていることや、弾性波法採用に当たって事前に数値解析によって弾性波の伝わり方を想定して、最適の測定方法や解析方法を提案しようとする試みがなされていることなどから、これらを上手く組合せることで今後の技術開発が進展すると考えている。

図-5.1は、竣工後まもなく供用を開始した構造物の性能低下と、それが維持管理限界に近づいた場合に、何らかの対策を行い、その後も残存設計耐用期間内にも性能が低下していく状況を示している。このように、それほど厳しくない環境下でも構

図-5.1　合理的な維持管理における構造物の性能低下と対策、非破壊検査の役割のイメージとの関係

造物の性能が時間とともに低下することは、いかに優れた対策を実施しても避けられないことである。すなわち、維持管理では点検時の構造物の性能と、将来の性能の低下をいかに正確に捉えられるかが重要である。しかし、国土交通省の方針は外観目視が主体であり、外観目視だけでは、構造物の性能低下に直結する変状の有無を、顕著な損傷として取り上げることは出来ても、その原因や劣化の進行速度の推定など維持管理対策の実施時期や、対策方法の立案を行うためのデータ収集がないなど、合理的かつ効率的な維持管理サイクルを実現するためには未だ不十分と考えられる。

重要なことは、維持管理上の対策として何らかの補修や補強を実施しても、完全に劣化因子が取り除かれなかった場合には、その後も何らかの劣化現象が進行することであり、それが外観上把握しやすいひび割れやコンクリートの浮き等を伴わないままコンクリート内部で進行することもある。このような最悪の事態を避けるためにも、構造物内部の欠陥の有無や進行を検査するとともに、劣化の状況を正確に把握する必要がある。

5.2.3　ポストテンション方式ＰＣ構造物のグラウト充填問題について

ポストテンション方式で建設されたＰＣ構造物の耐荷性能と耐久性能を確保し、さらに第三者影響を防止する観点からは、維持管理上はＰＣグラウト未充填部を検出して、それらに対して完全再充填を目標とした補修工事を実施することが基本となる。

横締めＰＣ鋼材のグラウト未充填部を探す第一段階としては、衝撃弾性波法が適していることを示した。衝撃弾性波法では、ＰＣ鋼材１本当たりの平均的なグラウト充填状況は識別できるが、再充填する範囲を特定するためには、間詰部分でシースを削孔し、内部を確認するか、空気を送り込んでその注入量と注入時間などから空隙の大きさを特定することができる。

また、この衝撃弾性波法では、ＰＣ梁橋脚の梁部分に配置されているＰＣ鋼材のグラウト充填状況も床板横締めや横桁横締めのグラウト調査と同様の方法でグラウト充填状況を推定できる。ＰＣ梁橋脚ではＰＣ鋼材の長さがこと長くなるが、最大 30m程度までなら、衝撃弾性波法の適用が可能である。

前述のように衝撃弾性波法は、鋼材１本当たりの平均的なグラウト充填状況を推定するものであることから、横締め鋼材の両定着端へ、ほぼ同時に弾性波の入力と出力用の探触子を取り付ける必要があり、測定がやや煩雑になるが、着目するのは、「伝播エネルギ（入出力比）」と伝播速度であるため、複雑な解析をせずにその場でグラウト充填状況を推定できる。グラウト再充填の準備ができていれば、点検から補修工事までを短時間で終了させられるという利点もある。

次に主鋼材のグラウト充填状況に関する調査であるが、計測したいシースの直上と思われる個所に探触子を配置し、その近傍で鋼球による打撃で弾性波を入力して、桁界面からの反射波と、シースからの反射波の有無とその位置とから充填状況を推定するインパクトエコー法が適していると考えている。先の衝撃弾性波法とは異なり、グラウト充填状況を推定したい位置に接近できれば測定できることから、簡便な測定といえる。しかし、反射波の判定には、部材厚さ、シース位置、弾性波速度などの他に、反射波形の解析が必要であり、グラウト充填状況の評価には少し時間が必要である。

インパクトエコー法をＴ桁ウエブで実施する場合などには、曲げ上げられた上縁定着部から一定間隔で測定点を設定すれば、部材厚さ、シース位置、弾性波速度などを同一と見なせるので、充填状況判定は簡便となる可能性がある。このようにインパクトエコー法を採用する場合には、出来るだけ同一鋼材を対象に位置をズラしながら測定を繰り返すような測定点配置とするとよい。また、インパクトエコー法では、捉えたい反射波が微弱であったり、部材界面からの反射波やシース周辺の微細なひび割れなどの影響を受けて、判断を誤る危険性があることから、条件を確認するため、削孔してシース内を確認したデータと比較することがより望ましい。

インパクトエコー法でグラウト再充填が必要となった場合には、鋼材の腐食状態を確認するために削孔、CCD カメラによる調査も必要である。またグラウト充填量を確認するために前述のような空気を圧送して、注入範囲を確認しておくことも重要である。このようにＰＣ主鋼材のグラウト未充填部が発見された場合には、ＰＣ鋼材の健全度についても検討し、現時点あるいは近い将来の耐荷性能についても確認するなど慎重な対応が必要となる。

5.2.4　アルカリシリカ反応が顕在化した構造物の内部劣化問題について

アルカリシリカ反応劣化が顕在化した構造物の内部劣化状態を推定する方法としては、橋脚梁部材のように表面に表れた幅の大きなひび割れが、梁内部のどのあたりまで進行しているのかについては、超音波斜角法である程度推定できることが分かった。アルカリシリカ反応で幅の大きなひび割れが発見された場合、それが拘束鉄筋の内側に大きく進展しているのか、否かは構造物の耐荷性能や耐久性能に影響し、検討結果によっては第三者影響度も含めた対策の必要性も検討しなければならない。

超音波斜角法は、ひび割れを取り囲むように探触子が配置できれば計測できるので、比較的簡単な調査方法である。このためひび割れによる劣化が、維持管理限界に近づいている状況をコア採取や、はつりによらずに把握できる方法として利用してもらえるのではないかと考えている。

また、アルカリシリカ反応が顕在化した場合、表面からの防水、あるいは第三者影響を防止する観点から、エポキシ樹脂注入や炭素繊維シートによる表面被覆が行われることも多い。このような場合、構造物表面ではひび割れが覆われて、損傷が無いかのような状態となるが、すでに浸透した雨水や有害物質が部材内部で反応性骨材に作用して、内部でアルカリシリカ反応が進行することも考えられる。本論文では、このように構造物内部で進行するアルカリシリカ反応による微細ひび割れの進展を、超音波トモグラフィ法によりスペクトル重心の低下として把握できることを示した。この方法を適切に点検手法として取り入れれば、コア採取やはつりを行わずにコンクリート構造物内部のアルカリシリカ反応の進行過程を評価できることから、今後超音波スペクトル重心とコンクリートの物性との関係を評価できるデータを収集することによって、耐荷性能の評価や補修・補強効果の確認にも活用できる可能性が高いと考えられる。

5.3　おわりに―非破壊検査に要求されるもの―

筆者は、これまで幾多の業務、使用した広範な非破壊検査手法および機器を通じて、コンクリート構造物を対象に非破壊検査を実施してきた。ここでは、実構造物に適用する実務的な非破壊試験の理想像に関して、以下の３点について再度論じたい。

１．原理が簡単であること
２．現場で、検査結果の概要を報告できること
３．装置がなるべく単純で、安価であること

１．原理が簡単であること

コンクリート構造物を点検する技術者にとって、特別な知識が必要でなく、日常慣れ親しんでいる技術の延長線上で、測定原理を理解でき、適用範囲が単純かつ明快に見極められることが重要である。参考書籍を読み漁らなければ測定原理を理解できなかったり、取扱い説明書を隅々まで読まなければ適用範囲の把握も十分にできない手法・装置は、点検の現場で非破壊検査法として採用することは難しいと考えている。

たとえば衝撃弾性波法は、ハンマやバネポインタで弾性波を発振し、ＡＥセンサ等の探触子で受振するという非常に簡便な方法である。発振信号の再現性が問題視される場合もあるが、弾性波をコンクリートやＰＣ鋼材上を伝播させ、その間の変化から伝播経路のグラウト充填状況を把握するものであるので、複数回データの取り込みを行い、その場で異常値を削除して平均的な値を記録するように測定すれば、安定的に結果を収録できる。これは非破壊検査にとって長所の一つであり、比較的簡単に繰り返し測定できることも重要である。点検者が異常な値かそうでないかをその場で判断するためには、コンクリート構造物に対して適当な知識を持っていることと、測定方法を理解していることとが重要である。すなわち当初に述べた「原理が簡単なこと」は、現場で正誤を判断できて、収録しやすい非破壊検査法にとって望まれる理由となると考えられる。

２．現場で、検査結果の概要を報告できること

点検と言えども、構造物に接近するためには、仮設備や交通規制が必要になることも多く、また第三者影響度防止の観点などから、点検結果によっては、直ちに応急処置に取り掛かる場合もある。このため非破壊検査結果については、詳細な分析や解析が必要な場合も想定されるが、正確な定量的表現は出来ないとしても、構造物に接近して非破壊検査を実施した印象も含めて、それなりの報告ができることも大切である。すなわち、非破壊検査を行う点検者は少なくともコンクリート構造物の建設や、劣化現象に関して基本的な知識を持っていることを前提としているので、検査結果の詳細は報告できなくても、その損傷度が維持管理水準内にあるか否かの報告は提出する必要がある。

非破壊検査法だけから考えれば、測定値がばらつく、あるいは傾向として大きな値となっているのか、逆に小さすぎるのか、というようなことから、予想される結果を推定値として報告できる方法が好ましいといえる。

また、非破壊検査結果を受けて、直ちに補修・補強対策の要否を判断しなければならない場合も少なくないことから、測定後あまり長い時間が必要な方法はあまり好ましくないといえる。

測定結果をどのように使えば構造物の性能を評価することになるのか、その結果を維持管理の対策の選択にどのように生かせるのか等を、点検者があらかじめ検討しておくことも重要である。

３．装置がなるべく単純で、安価であること

装置が点検足場の上に人力で持ち上げられる程度の大きさ、あるいは重量であることが望ましく、作業者の安全に対して害のない装置でなければならない。また、維持管理の現場では当初想定しない状況となることも考えられるので、装置は取扱いが簡単で、壊れにくいこと、あるいは万一測定装置が故障しても代替器が一般のリース会社等で容易に手に入れられること等も大切である。

また当然のことではあるが、装置そのものや部品、備品が安価であることも重要である。また装置によっては精密な機械となるほど定期的に感度校正を要するなど、測定装置の保守管理を行わないと精度が保障されないものもある。このため、現場で使用する装置類はいたずらに高精度・高機能なものを採用しないようにしなければならない。

これらの問題点を解消できて初めて現場に適応できる点検方法となるが、実際に点検の補助的手段として「コンクリート構造物に適用できる非破壊検査技術」として広く使用していくためには、次のような要求条件がある。

① 点検者は、コンクリート構造物の建設と劣化現象に関して適当な知識を持っていること。

② 点検者は、非破壊検査に関しても基本的な知識を有していること。

また、非破壊検査に用いる装置類に関しては、メーカに対しては次のような要望を伝えて、協力を仰ぐようにすることも必要である。

① 点検者にそれほど多くの測定経験がなく機材に習熟していなくても、使用できる装置であること。

② 装置の精度、適用範囲などの説明を屋外のコンクリート構造物に適用すること、水濡れ・砂埃・高温・低温等の環境変化を想定して、平易に説明した取扱説明書を作成すること。

③ 装置は壊れにくいように単純で耐久性が高く、その機能を確認する校正が簡単に行えること。

④ 装置は取扱いが簡単で、かつ小型軽量で、安価であること。

非破壊検査法は、コンクリート構造物を壊さずに、コンクリートの品質や欠陥を評価できるという利点を持っているが、必ずしも点検者が欲しがる情報を全て得られるという万能な方法ではないことを利用者に十分に認識して頂く必要がある。例えば、弾性波法に関しても次のような要求条件がある。

① 非破壊検査法には適用限界があり、その条件内で使用しなければ、精度に問題が残る。

② 適用しようとする非破壊検査法の実績の中に、対象構造物とほぼ同様な形状、コンクリート強度、環境条件のものがあれば参考とすれば良いが、実績のない構造物を測定対象とする場合にはこれらの条件が測定結果にどのような影響をあたえるのか、事前に検討しておく必要がある。

③ 非破壊検査は、コンクリート構造物の変状を目視点検のように直接的には評価している訳ではない。例えば、点検者がひび割れ深さや構造物内部の欠陥の大きさを測定したいと考えていても、非破壊検査では弾性波伝播速度や周波数等を測定しており、ひび割れ深さや欠陥の大きさは、何らかの変換を行ってデータとして提出される。このため、点検者がコンクリート部材を切断してひび割れ深さや欠陥の大きさを直接目視して判断した結果とは異なることがある。この差異を非破壊検査法の誤差と表現されることが多いが、目視した状態が構造物の真の状況を代表しているとは言い切れない場合もあるのではないかと考えている。

本論文では弾性波法を取り上げて、その中の衝撃弾性波法、インパクトエコー法、超音波法等について供試体による実験を行って、検査手法の妥当性が検証できれば、実構造物での測定を行うという手順を研究の基本的な流れとした。この実橋での測定結果を踏まえ、手法ごとの適用限界、精度などを評価して、現場適用を目的とした検査方法を提案しようと試みたが、方法によっては弾性波の反射や散乱の影響を解決できなかったこと、周波数分析に関して微弱な縦波共振しか得られない場合の解析方法を探り当てられなかったこと等が今後の課題である。これらの残された課題に対して積極的に取り組み、弾性波法の適用範囲拡大を実現させたいと考えている。

謝辞

本論文は、筆者がコンクリート構造物の維持管理に少しでも自分の技術を少しでも役立てたいと、1987年に株式会社 国際建設技術研究所を設立してから、これまで多数の現場でいろいろなお話を伺いながら実施してきた業務を、主に橋梁の非破壊検査法に重点を置いて研究成果として整理したものです。研究を進めるにあたり、多くの皆様から貴重なご指導、ご助言を賜りましたことを、先ずここに深く感謝いたします。

京都大学大学院教授 宮川豊章博士には、本論文をまとめることを強く勧めて頂いただけでなく、本研究の遂行にあたっては、ドクターゼミを通じて適切なご指導を賜り、ともすればくじけそうになる筆者を叱咤激励頂き、本当にお忙しい時期にも係わらず論文執筆にあたって暖かいご指導を頂けたことに、深甚なる感謝の意を表します。また、先生には1992年より土木学会コンクリート標準示方書改定委員会に参加させていただき、多方面の研究者の皆様と親交を結ばせて頂けたことは、本論文をまとめるという大きな動機づけとなったと思っております。長い時間を要しましたが、先生の真摯なご指導のおかげで目標に到達することが出来ました。先生への感謝をしっかりと胸に刻んで、非破壊検査技術の進展に向けさらに精進していかねばと心を新たにする次第です。

京都大学大学院教授 白土博通博士および同准教授 山本貴士博士には、本論文の作成および取りまとめにあたり、貴重なご指導ご助言を賜りました。ここに、謹んで厚くお礼申し上げます。

立命館大学教授 故明石外世樹博士には、1970年にコンクリート構造物の非破壊検査へお導きいただいただけでなく、至らぬ筆者に土木技術者としての生き方についてもご示唆をいただき、陰ながら宮川豊章博士への引継ぎまでして頂けたものと、謹んで深くお礼申し上げます。

大阪大学大学院教授 鎌田敏郎博士には、弾性波法に関する本研究に対し、折に触れご助言を賜りました。また、暖かいお言葉を掛けていただき、大きな励みとなりました。ここに心より感謝しお礼申し上げます。

京都大学大学院特定教授 塩谷智基博士、立命館大学特別任用教授 尼崎省二博士、一般財団法人日本建築総合試験所 永山勝博士、非破壊検査株式会社 森雅司氏には、研究の遂行にあたり、貴重なご助言をいただきました。厚くお礼申し上げます。

三井住友建設株式会社 室田敬博士、株式会社ピーエス三菱 小林仁博士、西日本旅客鉄道株式会社 吉田隆裕氏には、論文の構成等に関し適切なご助言をいただきました。記して感謝致します。

金沢大学教授 鳥居和之博士、東京工業大学大学院教授 大即信明博士、岐阜大学教授 六郷恵哲博士、東京大学教授 岸利治博士、岐阜大学教授 国枝稔博士には、土木学会、日本材料学会

の委員会等でお目にかかる度に、筆者の論文の進行状況を気にかけて下さり、折に触れ適切なご助言をいただきました。ここに深くお礼申し上げます。

筆者に実務面から、いろいろな情報をお伝え頂くだけでなく、技術開発に当たって有益な示唆を頂いた、独立行政法人土木研究所 渡辺博志博士、東日本旅客鉄道株式会社 松田芳範博士、ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社 稲熊唯史博士、西日本旅客鉄道株式会社 松田好史博士、西日本高速道路株式会社 横山和昭博士、阪神高速技術株式会社 南荘淳博士、阪神高速技研株式会社 松本茂博士、阪神高速道路株式会社 佐々木一則博士、名古屋高速道路公社 鷲見高典博士をはじめとして、多くの方々にお世話になりました。謹んでお礼申し上げます。

京都大学大学院准教授 安琳博士、同助教 高谷哲博士には、本論文作成にあたり常に暖かい言葉でご指導ご鞭撻を賜りました。ここに厚くお礼申し上げます。また研究室秘書の三木由有氏にはガラパゴス化した筆者の事務手続き等で大変お世話になり、有難うございました。

論文作成にあたり、博士課程で時期を同じくした方々とは、ドクターゼミや終了後の懇親会の場で、意見交換や楽しい一時を過ごさせていただきましたこと、お礼申し上げます。ここに皆様のお名前を挙げさせていただき、感謝の意とさせて頂きます。

西日本高速道路株式会社 本庄清司氏、独立行政法人土木研究所 河野哲也博士、株式会社IHIインフラ建設 山下亮博士、株式会社ピーエス三菱 小林仁博士、西日本旅客鉄道株式会社 吉田隆裕氏、三井住友建設株式会社 室田敬博士、西日本旅客鉄道株式会社 村田一郎博士、一般財団法人日本塗料検査協会 山田卓司博士、電気化学工業株式会社 宮口克一博士、三井住友建設株式会社 佐々木亘博士（順不同）。

他にも、多くの方々のご指導、ご協力があって、本論文は完成しました。紙面の都合ですべての皆様のお名前を紹介できませんでしたが、厚くお礼申し上げます。

最後になりましたが、社長が論文作成に夢中になっているにも係わらず淡々と日常の仕事に精を出された株式会社国際建設技術研究所の社員の皆様には心よりお礼申し上げます。とくに論文執筆にあたって、手の遅い社長に呆れながらも最後までご支援頂いた、弊社顧問 小林茂広博士、同 池口貴子氏には感謝、また感謝の言葉しかありません。

故人となられましたジェイアール西日本コンサルタンツ株式会社 北後征雄博士との約束を果たすことが出来ました。北後博士の笑顔に、本論文と感謝の意を捧げます。

末筆となりましたが、影ながら応援してくれた妻の多美子、娘の直子、明子に感謝の意を表し、謝辞とさせて頂きます。

2015 年 3 月　　　　葛目　和宏